



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาการวัดค่าความถูกต้องของเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยการขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน

A Development of CNC Milling Machines Accuracy Measurement
by Standard Workpiece Machining

นามผู้วิจัย นายพรชัย ศรีพัชรารุช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชณะ รักษ์ศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์วิสุทธิ สุพิทักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์เกษญา วัชรระนุกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสีทวิ มตวทยลยศษตรศษสร

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาการวัดค่าความถูกต้องของเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยการขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน

A Development of CNC Milling Machines Accuracy Measurement

by Standard Workpiece Machining

โดย

นายพรชัย ศรีพัชรารุช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรชัย ศรีพิชราวุธ 2554: การพัฒนาการวัดค่าความถูกต้องของเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยการ
ขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng. 186 หน้า

ในปัจจุบันเครื่องจักรซีเอ็นซีได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เนื่องจาก
เครื่องจักรซีเอ็นซีสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน รวมทั้งยังมีความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่
เมื่อเครื่องจักรซีเอ็นซีถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง เครื่องจักรซีเอ็นซีจะมีความผิดพลาดทางด้าน
รูปร่างและโครงสร้างเกิดขึ้น ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวจะส่งผลทำให้ความถูกต้องและแม่นยำของ
เครื่องจักรลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินองค์ประกอบความผิดพลาด
ทางด้านรูปร่างและโครงสร้างของเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกนด้วยวิธีการวิเคราะห์จลนศาสตร์
ย้อนกลับโดยการขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน ซึ่งจะทำการเจาะรูชิ้นงานมีค่าความลึกที่แตกต่างกัน แล้ว
นำชิ้นงานไปวัดเพื่อหาตำแหน่งโดยใช้เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซึ่งความแตกต่างของตำแหน่งที่ทำการ
เจาะรูและวัดด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความผิดพลาดด้านตำแหน่งการ
เคลื่อนที่และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน
X, Y, Z มีแนวโน้มของค่าความผิดพลาดเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวัดความผิดพลาดด้วย
เลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ซึ่งมีค่าความแม่นยำในแนวแกนเท่ากับ -0.0190 mm, 0.0058 mm และ
-0.065 mm ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลกับการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโร
มิเตอร์โดยวิธีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในแกน X, Y, Z พบว่ามีค่าเท่ากับ
19.2 เปอร์เซ็นต์, 68.82 เปอร์เซ็นต์ และ 198.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า
งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องกัด
ซีเอ็นซี 3 แกนได้ ส่วนความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแนวแกนเมื่อเปรียบเทียบกับ การวัด
ความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์พบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งจะต้องทำการพัฒนา
ต่อไป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pornchai Sripitcharawat 2011: A Development of CNC Milling Machines Accuracy Measurement by Standard Workpiece Machining. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 186 pages.

Currently, CNC machines have been used in many industries because they can produce complex workpieces with high accuracy and precision. However, geometric and kinematic errors could happen when using CNC machines in the long runs, which result in the reduction of accuracy and precision. This research work aims to study and assess components of the geometric error in 3-axis CNC machines. In the assessment process, the inverse kinematic method was used by which the standard workpieces were drilled to make holes at different depths and their locations in X-, Y-, Z-axis were then measured by Coordinate Measuring Machines (CMMs). A difference between the measured and nominal locations in X-, Y-, Z-axis was used to calculate the error components, which were comprise of positioning and straightness errors by using the least square method.

Experimental results showed that determining the positioning error using the inverse kinematic method agreed well with that using laser interferometer measurement in X-, Y- Z-axis, which were -0.019, 0.006, and -0.065 mm, respectively. When compared with laser Interferometer measurement, mean absolute percentage errors (MAPE) in X-, Y-, Z-axis were 19.2, 68.2, and 198.2 percent. Therefore, the proposed measuring approach could be applied for the positioning errors of 3-axis CNC machines. However, this approach could not be applied for straightness error and needed to be further developed.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อาจารย์ ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยโดยตลอด ขอขอบพระคุณ กรรมการที่ปรึกษาร่วมอาจารย์ ดร.วิสุทธ์ สุพิทักษ์ และอาจารย์ ดร.เกษญา วัชรานุกุล รวมทั้ง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณเลิศ ทองเจือ ช่างเทคนิค ฝ่ายแม่พิมพ์พลาสติก สถาบันคั้นคว้าและพัฒนา เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือในการกีด ขึ้นงานมาตรฐาน รวมทั้งได้สอนการใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีเบื้องต้น อีกทั้งเอื้อเฟื้อเครื่องมือและ สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณฝ่ายเครื่องมือวัดและพนักงานฝ่ายเครื่องมือวัดทุกท่านให้การ ช่วยเหลือในการวัดเพื่อหาค่าประกอบความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซีที่ ขอขอบคุณสถาบัน มาตรฐานแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัย และคุณวิโรจน์ สุดาธรรม นักมาตรฐานวิทยา หอปฏิบัติการซีเอ็มเอ็มและเกียร์ ฝ่ายมาตรฐานวิทามิตี ที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดตำแหน่งของ ขึ้นงานมาตรฐานและให้ความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือวัดซึ่งอยู่ภายในหอปฏิบัติการซีเอ็มเอ็มและ เกียร์ ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่ศึกษาและทำวิจัยด้วยกันตลอดมา รวมทั้งยังให้ความ ช่วยเหลือ เสนอแนะข้อคิดเห็น รวมถึงให้กำลังใจในงานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่สนับสนุนทั้งกำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดี เสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจจนสำเร็จ การศึกษา

พรชัย ศรีพิชราวุธ

พฤษภาคม 2554

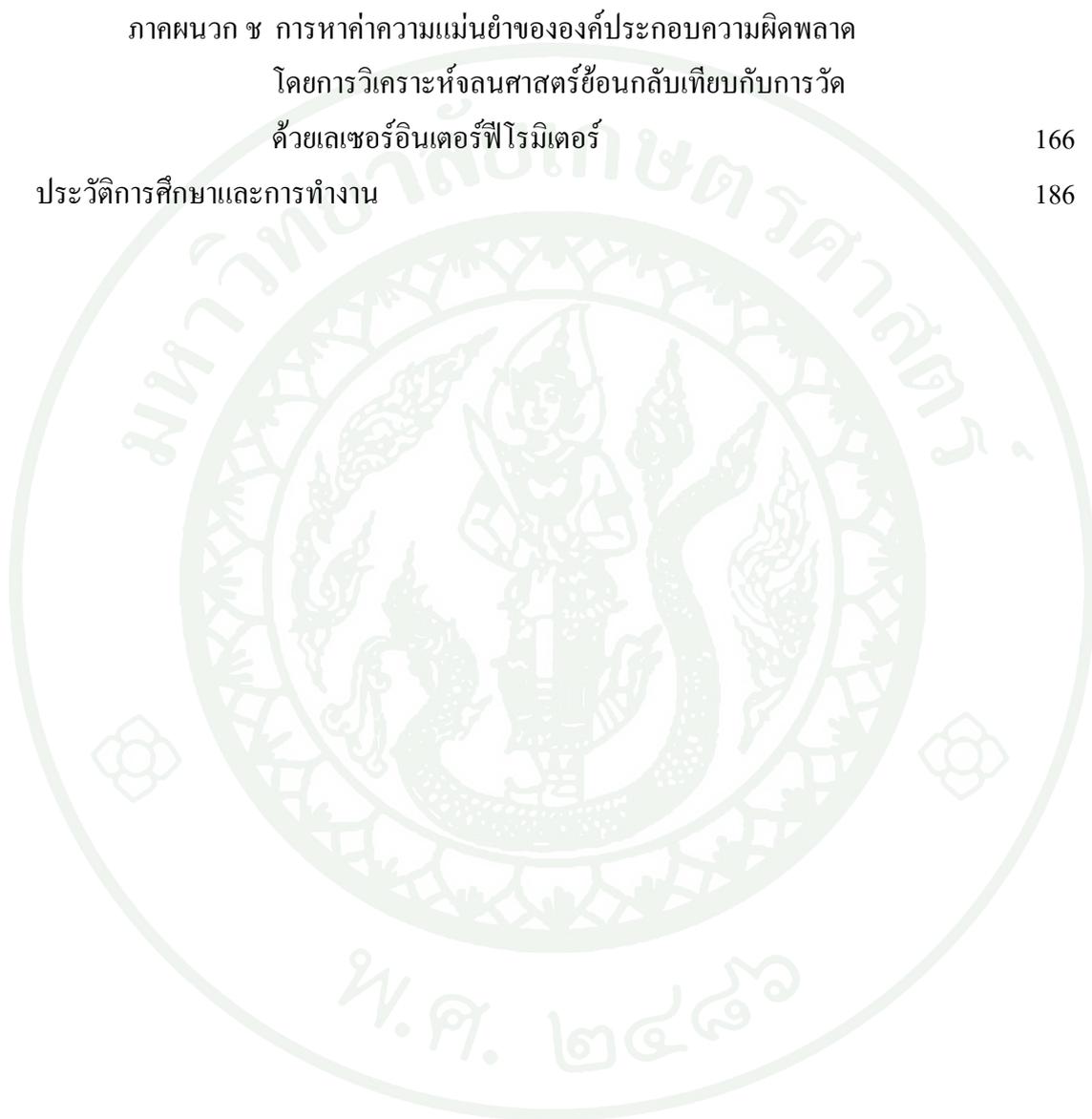
สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	65
ผล	65
วิจารณ์	95
สรุปและข้อเสนอแนะ	96
สรุป	96
ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	100
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก แบบชิ้นงานมาตรฐาน	107
ภาคผนวก ข จีไอต์ในการกััดชิ้นงานมาตรฐาน	111
ภาคผนวก ค ลำดับการวัดและผลการวัดตำแหน่งชิ้นงานมาตรฐานด้วย เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	123
ภาคผนวก ง การประมาณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์ জনসাস্ত্র্যখনকল্ল	140
ภาคผนวก จ ผลการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	153

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข การหาค่าความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาด โดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃত্য้อนกลับเทียบกับการวัด ด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	166
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	186



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	จำนวนความผิดพลาดของแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักร ซีเอ็นซี 3 แกน	10
2	สัญลักษณ์ขององค์ประกอบความผิดพลาด 21 องค์ประกอบของเครื่องจักร ซีเอ็นซี 3 แกน	11
3	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{yy}, \delta_{yz}, \delta_{zy}, \delta_{zz}$	55
4	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{xx}, \delta_{xz}, \delta_{zx}$	57
5	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ δ_{xy}, δ_{yx}	59
6	ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ ย้อนกลับตลอดช่วงความยาวของแกน	92
7	ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ ย้อนกลับของช่วงความยาวชิ้นงานมาตรฐาน	93
ตารางผนวกที่		
ก1	ตำแหน่งของชิ้นงานมาตรฐานที่ทำการออกแบบไว้	125
ก2	ผลการวัดตำแหน่งชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติ	128
ง1	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์ จลนศาสตร์ย้อนกลับ	141
ง2	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์ จลนศาสตร์ย้อนกลับ	143
ง3	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์ จลนศาสตร์ย้อนกลับ	144
ง4	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	145
ง5	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง6	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	147
ง7	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	148
ง8	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	149
ง9	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	151
จ1	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	154
จ2	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	156
จ3	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	157
จ4	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	158
จ5	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	159
จ6	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	160
จ7	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	161
จ8	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	162
จ9	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	164

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ช1	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ใน แนวแกน X	167
ช2	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ใน แนวแกน Y	170
ช3	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ใน แนวแกน Z	172
ช4	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	174
ช5	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	176
ช6	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	178
ช7	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	180
ช8	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	182
ช9	การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	184

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รายนามทางของเครื่องกัดซีเอ็นซี	4
2	บอลสกรูของเครื่องกัดซีเอ็นซี	4
3	ส่วนประกอบของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	5
4	แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	6
5	องค์ประกอบความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรายนามทางในแนวแกน X	9
6	ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้างของเครื่องจักร	11
7	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่	12
8	หมอนรองเครื่องจักรเมื่อความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่	14
9	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแนวแกน	14
10	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นในแนวนอน	15
11	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับตำแหน่งปลายของแกน	15
12	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ	16
13	ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่างๆ	17
14	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	18
15	หมอนรองเครื่องจักรเมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	18
16	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	19
17	หมอนรองเครื่องจักรเมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	19
18	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	19
19	โซ่จลนศาสตร์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความผิดพลาดทางปริมาตรของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	25
21	ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม	27
22	การประเมินความผิดพลาดค่าความผิดพลาดด้วยวิธี Direct Calibration Method โดยใช้ Laser Interferometer	30
23	ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	32
24	การติดตั้งชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	33
25	มิดกัทชิ้นงานที่ใช้ในการตัดเดือนชิ้นงานมาตรฐาน	37
26	เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	38
27	เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	39
28	แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ของ Renishaw ML10	40
29	ชุดชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยสภาวะแวดล้อม	40
30	กระจกสะท้อนและแทรกสอดแสงเลเซอร์	41
31	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูล	41
32	การออกแบบชิ้นงานมาตรฐานโดยใช้โปรแกรม Solid Edge	44
33	รูปแบบชิ้นงานมาตรฐาน	44
34	เส้นทางการเดินของมิดกัทเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ YZ	45
35	เส้นทางการเดินของมิดกัทเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ XZ	45
36	เส้นทางการเดินของมิดกัทเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ XY	45
37	ขั้นตอนการกัดชิ้นงานมาตรฐาน	48
38	ชิ้นงานมาตรฐานที่ทำการกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว	48
39	การวัดเพื่อหาพิกัดในระนาบ XY	49
40	การวัดเพื่อหาพิกัดในแนวแกน Z	50
41	ขั้นตอนการวัดชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	50
42	ตำแหน่งที่สั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปและตำแหน่งที่เกิดจากความผิดพลาดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง	51
43	การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เพื่อวัดองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	ขั้นตอนการวัดวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	61
45	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	65
46	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	66
47	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	67
48	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	68
49	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	69
50	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	70
51	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	71
52	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	72
53	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์জনসনসসসসসস	73
54	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	74
55	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	75
56	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
57	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	77
58	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	78
59	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	79
60	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	80
61	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	81
62	แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	82
63	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	83
64	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	84
65	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	85
66	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	86
67	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	87
68	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	88
69	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง ในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	91
ภาพผนวกที่		
ก1	แบบชิ้นงานมาตรฐาน	108
ค1	ลำดับการวัดชิ้นงานมาตรฐาน	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

δ_{xx}	=	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X
δ_{yy}	=	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
δ_{zz}	=	ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z
δ_{yx}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X
δ_{zx}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X
δ_{xy}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
δ_{zy}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
δ_{xz}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z
δ_{yz}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z
S_{xy}	=	ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ XY
S_{yz}	=	ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ YZ
S_{xz}	=	ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ XZ
\mathcal{E}_{xx}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน X ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน X
\mathcal{E}_{yx}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน X
\mathcal{E}_{zx}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน X
\mathcal{E}_{xy}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน X ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Y
\mathcal{E}_{yy}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Y
\mathcal{E}_{zy}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Y
\mathcal{E}_{xz}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน X ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Z
\mathcal{E}_{yz}	=	ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Z

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ε_{zz} = ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของแกน Z



การพัฒนาการวัดค่าความถูกต้องของเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยการขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน

A Development of CNC Milling Machines Accuracy Measurement

by Standard Workpiece Machining

คำนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ได้ถูกออกแบบให้มีความซับซ้อนและต้องการขนาดของชิ้นงานให้มีความถูกต้อง ตลอดจนมีค่าความคลาดเคลื่อนในการผลิตที่มีค่าต่ำ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ ในอุตสาหกรรมยานยนต์จำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องการชิ้นงานที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่ก็จำเป็นต้องผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างเพียงพอ ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ในสหรัฐอเมริกาต้องทำการลดค่าเผื่อ (Tolerance) ของกระบอกสูบในเครื่องยนต์ลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ยังคงปริมาณการผลิตเท่าเดิม (Mou, 1997) ดังนั้น เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตจะต้องมีความแม่นยำและเที่ยงตรง และยังสามารถในการผลิตที่สูง เครื่องจักรซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งยังสามารถที่จะผลิตชิ้นงานได้ในปริมาณที่มาก แต่เมื่อเครื่องจักรถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง เครื่องจักรจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น (Error) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตรงกับความถูกต้องของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด ยิ่งใช้งานเครื่องจักรมาก ก็ยิ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้มาก ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องจักรอยู่ตลอดเวลา เพื่อที่จะลดความผิดพลาดในการผลิตและทำให้จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพลดลง และยังสามารถช่วยลดกระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์จากเครื่องจักรนั้นๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในด้านการผลิตลง เพราะกระบวนการตรวจสอบคุณภาพเป็นกระบวนการที่ไม่เพิ่มมูลค่า งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบรูปร่างของชิ้นงานมาตรฐานเพื่อใช้ในการตรวจวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องกัดซีเอ็นซี

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้ คือ

1. เพื่อทำการศึกษาค่าความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้างและความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ (Geometric and Kinematic Errors) ของเครื่องจักรซีเอ็นซี
2. เพื่อทำการศึกษารูปแบบรูปร่างชิ้นงานมาตรฐานเพื่อใช้ในการหาค่าประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซี
3. เพื่อคำนวณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซี คือ ความผิดพลาดทางด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของการเคลื่อนที่ในแนวแกน

การตรวจเอกสาร

การดำเนินการวิจัยในเรื่องการพัฒนาการวัดค่าความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยการตัดเนื้อชิ้นงานมาตรฐานนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัย ซึ่งมีหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ

1. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน (3-Axis CNC Milling Machine)
2. ความผิดพลาดพื้นฐานของเครื่องจักร
3. การสังเคราะห์รูปแบบความผิดพลาดทางจลนศาสตร์
4. ความผิดพลาดทางปริมาตรของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน
5. การประเมินระบบการวัด
6. การประมาณค่าความผิดพลาด
7. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

1. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน (3-Axis CNC Milling Machine)

1.1 องค์ประกอบของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

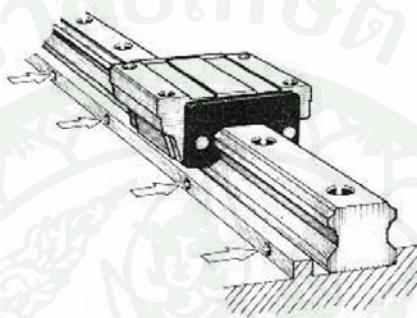
1.1.1 ชุดควบคุม (ชนะ, 2552) เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถจัดเก็บ โปรแกรม (Memory) และแก้ไขตัดแปลงโปรแกรม (Edit) ได้ คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจโปรแกรมที่ป้อนแล้วทำการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีให้ทำงานตามคำสั่งโปรแกรมเอ็นซี ชุดควบคุมประกอบด้วยแผงควบคุม (Control Panel), จอภาพ (Monitor), แป้นพิมพ์ (Keyboard or Keypad) และปุ่มสวิตช์ควบคุมต่างๆ เช่น ความเร็วฟีด (Feed), ความเร็วสปินเดิล (Spindle Speed) เป็นต้น

1.1.2 กลไกการเคลื่อนที่ เป็นชุดขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ต่างๆ ประกอบด้วย

ก. เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) มีหน้าที่รับคำสั่งทางไฟฟ้าจากชุดควบคุมมาแปลงเป็นการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งนั้นๆ

ข. ชุดรายงานตำแหน่ง (Position Feedback) มีหน้าที่อ่านตำแหน่งของแกนการเคลื่อนที่ต่างๆแล้วส่งค่ากลับไปให้กับชุดควบคุม โดยทั่วไปจะใช้เอ็นโค้ดเดอร์(Encoder) หรือลิเนียร์สเกล (Linear Scale)

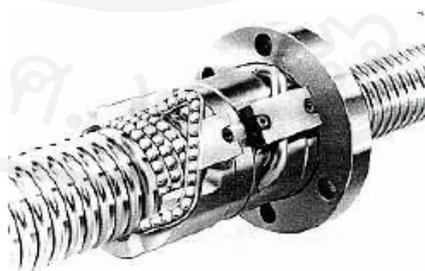
ค. รางนำทาง(Guide Way หรือ Slide Way) เป็นชุดประกอบให้แกนการเคลื่อนที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและให้ความแข็งแรงของโต๊ะและชุดสปินเดิลขณะขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รางนำทางของเครื่องกัดซีเอ็นซี

ที่มา: ชนะ (2549)

ง. บอลสกรูเป็นอุปกรณ์ที่แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมจากเซอร์โวมอเตอร์ไปเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 บอลสกรูของเครื่องกัดซีเอ็นซี

ที่มา: ชนะ (2549)

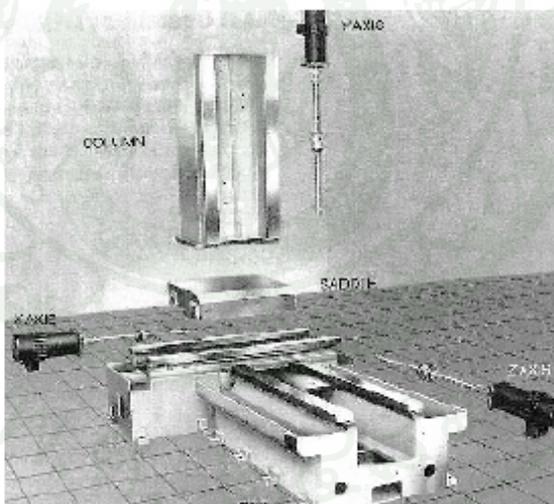
1.1.3 ตัวเครื่องจักรคือ โครงสร้างที่ประกอบเป็นรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามประเภทของเครื่องจักรนั้นๆ ตัวเครื่องจักรมีส่วนประกอบหลักหลายๆส่วน ดังภาพที่ 3 คือ

ก. แท่นเครื่อง (Machine Bed) เป็นโครงสร้างหลักของตัวเครื่องจักรสำหรับรองรับอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักร

ข. หมอนรองหรือแสดเคิล (Saddle) เคลื่อนที่ได้ 1 แกนบนแท่นเครื่อง เช่น แกน X หรือแกน Y

ค. โต๊ะ (Table) สำหรับวางชิ้นงานโดยทั่วไปโต๊ะเคลื่อนที่อยู่บนหมอนรองมีร่องรูปตัวที (T-slot) สำหรับใช้ในการจับยึดชิ้นงานให้แนบติดกับโต๊ะมีระนาบโต๊ะตั้งติดกับเสา

ง. เสา (Column) เป็นโครงสร้างสำหรับติดตั้งสปินเดิลเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์แนวตั้งรุ่นใหม่นิยมสร้างเป็นแบบเสาคู่ (Double Column) เพราะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า



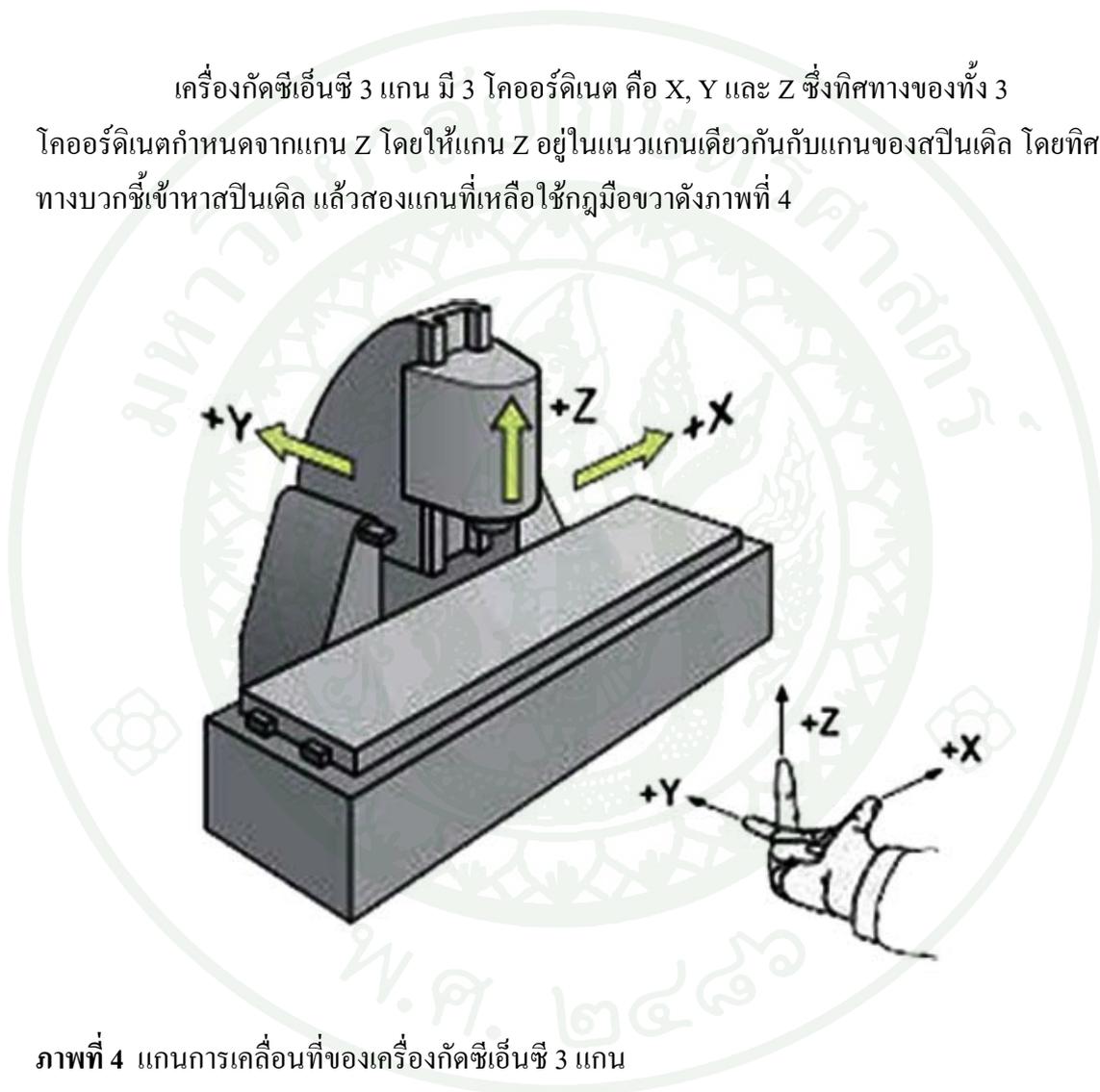
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

ที่มา: ชนะ (2549)

จ. สปินเดิล (Spindle) สำหรับติดตั้งชุดจับทูลแบบเทเปอร์แชงก์ (Tapered Shank) หรือแบบไฮสปีด (High Speed) โดยมีมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor) ขับเคลื่อนสปินเดิล ผ่านเกียร์หรือสายพานหรือต่อตรงรวมเป็นชุดเดียวกัน

1.2 แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน มี 3 โคออร์ดิเนต คือ X, Y และ Z ซึ่งทิศทางของทั้ง 3 โคออร์ดิเนตกำหนดจากแกน Z โดยให้แกน Z อยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของสปินเดิล โดยทิศทางบวกชี้เข้าหาสปินเดิล แล้วสองแกนที่เหลือใช้กฎมือขวาดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แกนการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

ที่มา: ชนะ (2549)

เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนแนวตั้ง มีโคออร์ดิเนต Z ในแนวตั้งและระนาบ XY ในแนวนอนหรือบนระนาบของโต๊ะวางชิ้นงาน โดยมีแกน X เป็นการเคลื่อนที่ซ้ายขวา แกน Y เป็นการเคลื่อนที่เข้าออก และแกน Z เป็นการเคลื่อนที่ขึ้นลงของมีดกัดเมื่อเทียบกับชิ้นงาน

2. ความผิดพลาดพื้นฐานของเครื่องจักร

2.1 แหล่งของความผิดพลาด (Error Sources)

เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้นมีความสามารถในการผลิตที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการออกแบบ ชุดควบคุมที่ใช้ งาน ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้เครื่องจักรมีราคาที่แตกต่างกัน และความแม่นยำในการผลิตก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดราคาของเครื่องจักรด้วย เครื่องจักรนั้นสร้างมาจากการนำเอาชิ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน เมื่อทำให้ชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้นเคลื่อนที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งความผิดพลาดนี้จะส่งผลต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool Tip Position) ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีความผิดพลาดเกิดขึ้น

ความผิดพลาดของเครื่องจักรสามารถแบ่งแยกความผิดพลาดเป็น 2 หมวดใหญ่ ๆ คือ ความผิดพลาดของเครื่องจักร เมื่อเครื่องจักรหยุดนิ่ง (Quasi-Static Errors) เป็นแหล่งความผิดพลาดที่เกิดจากความสัมพันธ์ทางตำแหน่งระหว่างชิ้นงาน (Workpiece) และอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool) ซึ่งความผิดพลาดนี้เกิดจากความสัมพันธ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (หรือเกิดขึ้นแต่ช้ามาก) (Slocum, 1992) แหล่งความผิดพลาดประเภทนี้จะประกอบด้วยความผิดพลาดประเภทต่างๆ คือ ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้าง (Geometric Errors), ความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ (Kinematic Errors), ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิต (Thermal Errors) และ ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากแรงในการตัดเฉือนในกระบวนการผลิต (Cutting-force Induced Errors) ส่วนความผิดพลาดขณะเครื่องจักรเคลื่อนที่ (Dynamic Errors) สาเหตุหลักเกิดจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเครื่องจักร ความผิดพลาดจากการหมุนของเพลา ซึ่งความผิดพลาดประเภทนี้จะเกิดขึ้นสัมพันธ์กับเวลา จากความผิดพลาดทั้งหมดที่กล่าวมาความผิดพลาดของเครื่องจักรเมื่อเครื่องจักรหยุดนิ่ง (Quasi-Static Errors) นั้นจะเป็นความผิดพลาดหลักของเครื่องจักรซึ่งเกิดขึ้นประมาณ 70% ของความผิดพลาดทั้งหมด (Bryan, 1990)

2.1.1 ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิต

(Thermal Errors)

เครื่องจักรที่มีการผลิตต่อเนื่องตลอดเวลาไม่สามารถหลีกเลี่ยงความผันแปรของอุณหภูมิได้ เนื่องจากมีความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักรและความร้อนของสภาพแวดล้อมซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของเครื่องจักร ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิตสามารถเกิดได้จาก 6 แหล่งคือ 1. ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน 2. เกิดจากความร้อนของเครื่องจักร 3. น้ำมันของระบบไฮดรอลิกส์ 4. ความร้อนจากอุณหภูมิห้อง 5. ผู้ปฏิบัติงาน 6. ความร้อนสะสมของสภาพแวดล้อม (Bryan, 1990) ซึ่งความผิดพลาดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิตนั้นยากที่จะพยากรณ์และหาค่า ถ้าหากมีการพิจารณาโครงสร้างของเครื่องจักรที่มีความซับซ้อน

2.1.2 ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากแรงในการตัดเฉือน

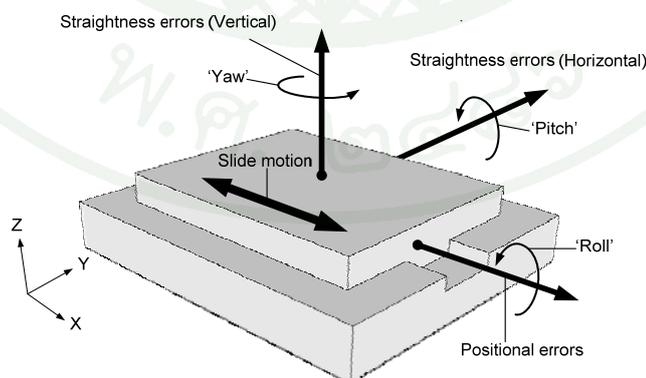
(Cutting-force induced Errors)

แรงในการตัดเฉือนนั้นเป็นสาเหตุที่อาจจะทำให้ชิ้นงานหรืออุปกรณ์ตัดเฉือนนั้นมีการเสียรูป (Deformation) ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนั้นยังอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเครื่องจักรนั้นด้วย (Baosheng, 2010) ในอดีตนั้นเราจะไม่ทำการพิจารณาแรงซึ่งเกิดจากการตัดเฉือนชิ้นงานนั้น แต่ปัจจุบันเมื่อเครื่องจักรมีความสามารถในการตัดเฉือนที่มีความเร็วสูงรวมถึงวัสดุที่ใช้มีความแข็งแรงมาก ดังนั้นแรงที่ใช้ในการตัดเฉือนจึงถูกนำมาพิจารณา ในกระบวนการผลิตจากชิ้นงานดิบจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นชิ้นงานสำเร็จรูปนั้นจะต้องผ่านขั้นตอนการตัดเฉือนชิ้นงานออก ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความลึกในการตัดเฉือนชิ้นงานนั้น ถ้าหากความลึกในการตัดเฉือนชิ้นงานนั้นมากจะส่งผลทำให้แรงกระทำต่อชิ้นงานนั้นมีมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดของเครื่องจักรซึ่งจะทำให้ความแม่นยำของเครื่องจักรลดลง

2.1.3 ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้าง (Geometric Errors)

แรงที่เกิดจากน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆที่กระทำเมื่อเครื่องจักรหยุดนิ่งนั้นมีผลอย่างมากต่อความผิดพลาดของเครื่องจักร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของเครื่องจักรเกิดขึ้น ขนาดและทิศทางของแรง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์จะส่งผลต่อความเข้มข้นความเค้น (Stress Intensity) ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียรูปของโครงสร้างของเครื่องจักรขึ้น จากการเสียรูปของโครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลทำให้เครื่องจักรมีความผิดพลาดขึ้น นั่นก็คือความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้าง (Geometric Errors) ซึ่งความผิดพลาดนี้จะถูกพิจารณาตั้งแต่กระบวนการออกแบบ แต่ความผิดพลาดก็อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการประกอบได้ ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้างมีองค์ประกอบจากความผิดพลาดต่างๆ เช่น ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่, ความตรงและความเรียบในการเคลื่อนที่ (Jung *et al.*, 2006) เป็นต้น ความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ (Kinematic Errors) เป็นความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรที่มีความสัมพันธ์กัน ความผิดพลาดนี้ส่วนใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของหลายๆแกนพร้อมกัน โดยที่ความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ (Kinematic Errors) มีองค์ประกอบความผิดพลาดจากความไม่ตั้งฉากกันของแกนและความไม่ขนานของแกนเมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง

โดยทั่วไปเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเมื่อเครื่องจักรทำการผลิต เช่น ชุดขับเคลื่อน, Cross Slide ,เพลลา ซึ่งความผิดพลาดต่างๆที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรางนำทางตามแนวแกน X สามารถเกิดความผิดพลาดได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 องค์ประกอบความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรางนำทางในแนวแกน X

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ตามแนวแกน X ประกอบด้วยความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ (ε_{ij}) และความผิดพลาดจากการเลื่อนในแนวแกน (δ_{ij}) โดยที่ δ_{xx} คือความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, δ_{yx}, δ_{zx} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบไปด้วย Pitch Error (ε_{yx}), Yaw Error (ε_{zx}) และ Roll Error (ε_{xx}) (Raksiri and Parnichkun, 2002)

สำหรับในการเคลื่อนที่ที่หนึ่งแกนนั้นสามารถเกิดความผิดพลาดได้ 6 องค์ประกอบ สำหรับระบบที่มีการเคลื่อนที่โดยที่แกนทั้งสองตั้งฉากกันสามารถเกิดความผิดพลาดที่เป็นไปได้ 13 องค์ประกอบ และระบบที่มีการเคลื่อนที่โดยที่มีแกนตั้งฉากกัน 3 แกนอาจจะมีองค์ประกอบที่เป็นไปได้ 21 องค์ประกอบ ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 1, 2 และภาพที่ 6

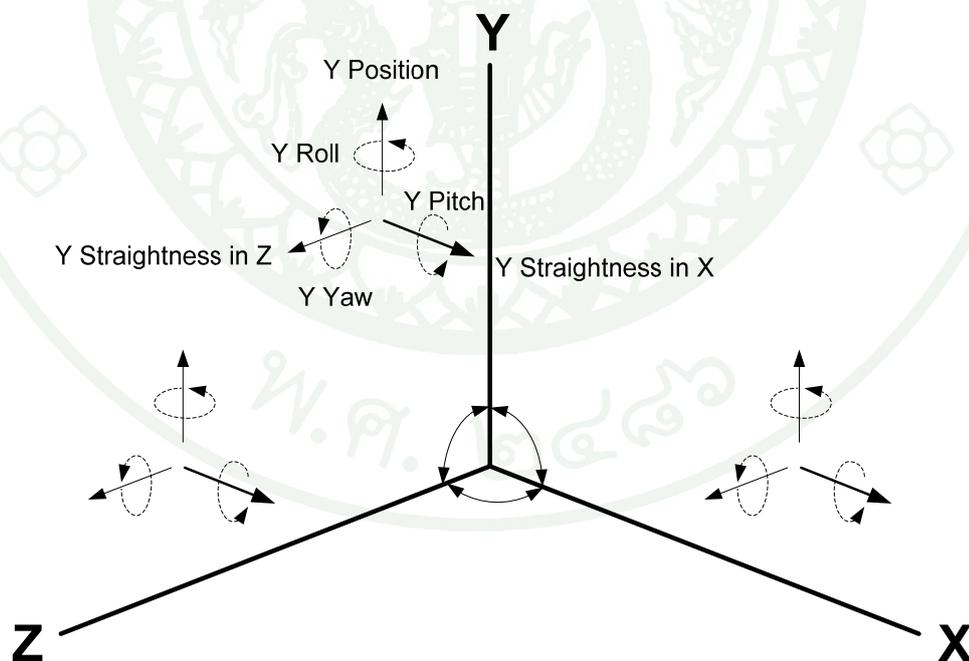
ตารางที่ 1 จำนวนความผิดพลาดของแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกน

องค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกน	องค์ประกอบของความผิดพลาด
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่	3
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่	6
ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกน	3
ความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่	9
	21 องค์ประกอบ

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ขององค์ประกอบความผิดพลาด 21 องค์ประกอบของ
เครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกน

องค์ประกอบความผิดพลาด	X	Y	Z
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่	δ_{xx}	δ_{yy}	δ_{zz}
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่	δ_{yx}, δ_{zx}	δ_{xy}, δ_{zy}	δ_{xz}, δ_{yz}
ความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่			
- Roll Error	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}
- Pitch Error	ϵ_{yx}	ϵ_{zy}	ϵ_{xz}
- Yaw Error	ϵ_{zx}	ϵ_{xy}	ϵ_{yz}
ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกน	S_{xy}	S_{zx}	S_{zy}

ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



ภาพที่ 6 ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้างของเครื่องจักร

ที่มา: Rahman (2004)

ก. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Positioning Error)

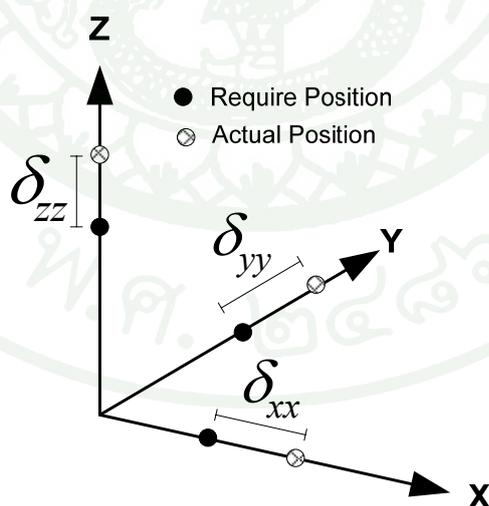
ในระบบควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี ความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่นั้นเป็นสิ่งสำคัญ ความหมายของความผิดพลาดของตำแหน่ง คือ ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งที่ต้องการ (Require Position) กับตำแหน่งจริง (Actual Position) ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความถูกต้องและความละเอียดของชุดวัดตำแหน่ง, ชุดขับเคลื่อนการสึกหรอ เช่น สายพานลวม, ความถูกต้องของระยะพิชของบอลสกรู ซึ่งความถูกต้องทางด้านตำแหน่งนี้สามารถชดเชยหรือปรับปรุงขึ้นโดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมของแกนต่างๆ ในเครื่องจักรซีเอ็นซี สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่าความผิดพลาดนี้คือ $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$ (Raksiri and Parnichkun, 2004)

โดยที่ δ_{xx} คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

δ_{yy} คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

δ_{zz} คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่

ข. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแนวแกน
(Straightness Error)

เป็นการเคลื่อนที่ซึ่งมีการเบี่ยงเบนออกจากแนวแกน โดยที่ทิศทางการเคลื่อนที่นั้นจะตั้งฉากกับระนาบในแนวแกนนอนและระนาบในแนวแกนตั้ง เช่น เมื่อมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X จะมีการเบี่ยงเบนออกจากแนวแกน X ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกน Y หรือเกิดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกน Z ซึ่งในการเคลื่อนที่ที่ต้องการให้มีความเป็นเส้นตรงมากที่สุดเท่าที่ทำได้ (Mekid, 2009) ความผิดพลาดนี้สามารถใช้สัญลักษณ์แทนคือ δ_{ij} เมื่อ $i \neq j$ โดย δ_{ij} หมายถึง เป็นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน i เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน j ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ต่างๆ ประกอบด้วย คือ

δ_{yx} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน X

δ_{zx} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน X

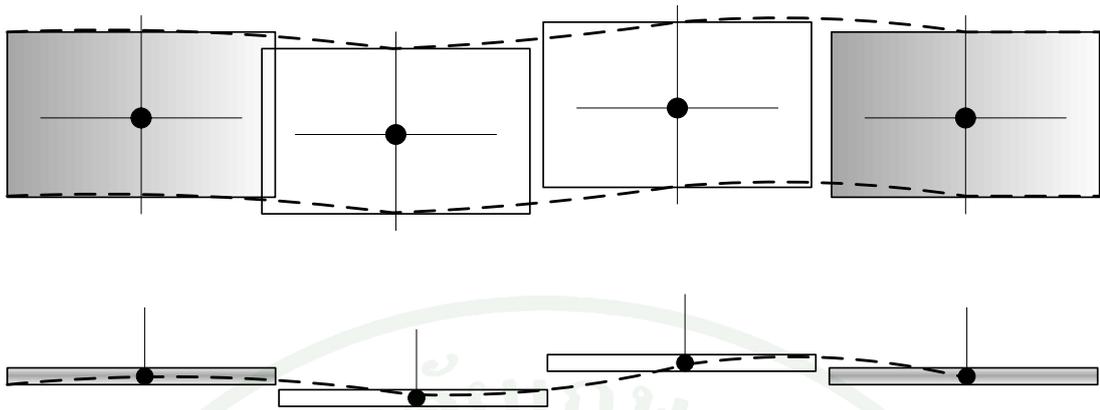
δ_{xy} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน Y

δ_{zy} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน Y

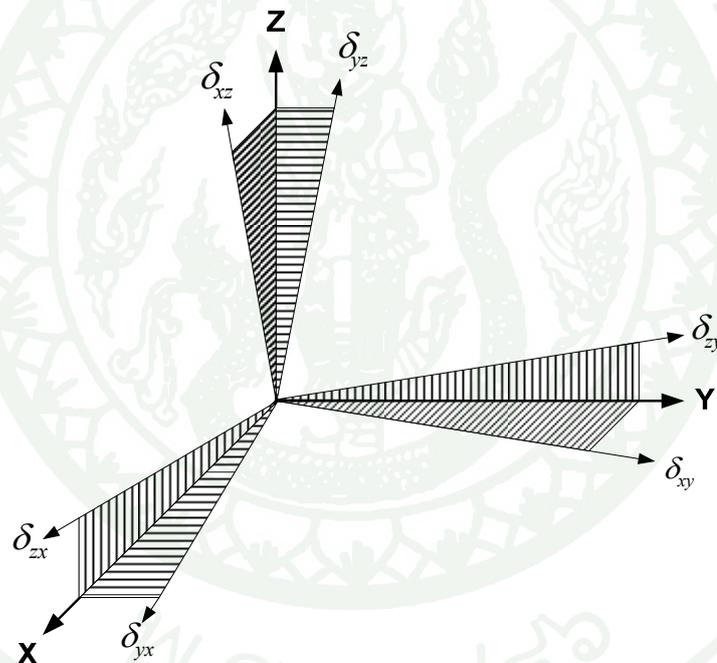
δ_{xz} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน Z

δ_{yz} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ในแกน Z

(Raksiri and Parnichkun, 2004) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8 และ 9



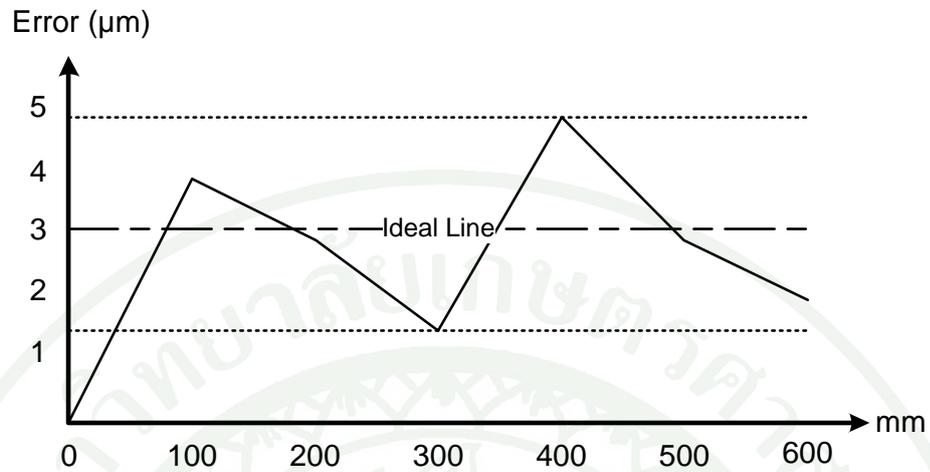
ภาพที่ 8 หมอนรองเครื่องจักรเมื่อความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อน



ภาพที่ 9 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่

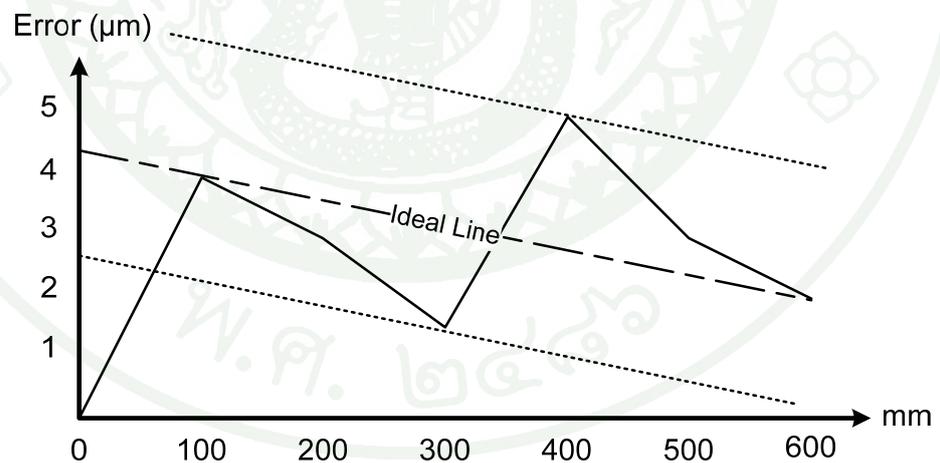
ในการหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแนวแกน เราสามารถทำการหาโดยพิจารณาจากระยะที่มากที่สุดของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง (Dhanish, 2007) ซึ่งการวัดค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่นั้นจะทำการพิจารณาจากเส้นอุดมคติ (Ideal Line) ได้ 3 แบบ คือ

1) ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นในแนวนอน (Straightness Error With Respect to Horizontal Line) ดังภาพที่ 10



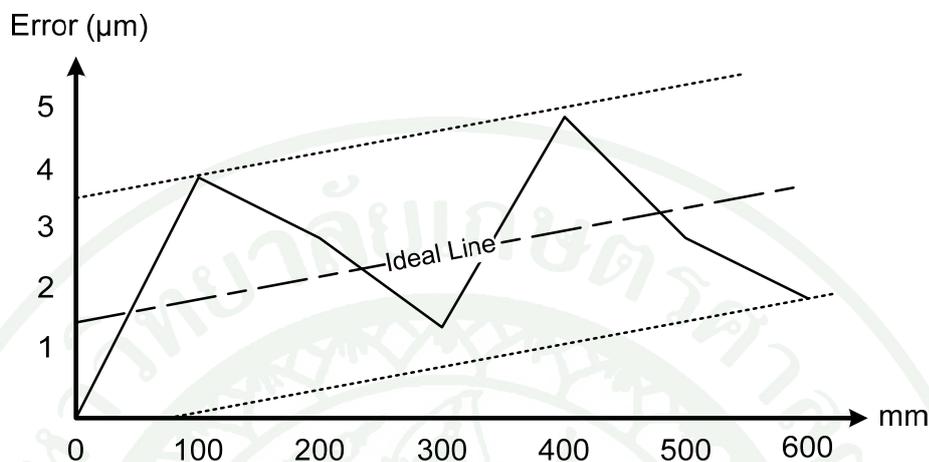
ภาพที่ 10 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นในแนวนอน

2) ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับตำแหน่งปลายของแกน (Straightness Error With Respect to the End Point Line) ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับตำแหน่งปลายของแกน

3) ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ
(Straightness Error With Respect to the Least Square Line) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงเมื่อเทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ

ก. ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่างๆ
(Squareness Error)

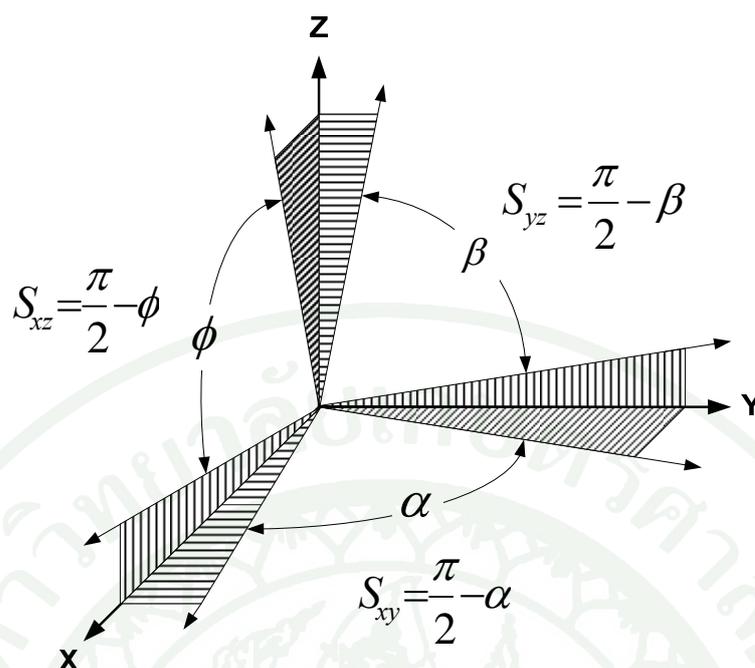
คือการที่ระนาบหรือแกนนั้นๆ ตั้งฉากกับระนาบหรือแกนอื่นๆ โดยที่ความเป็นมุมฉากจะกำหนดให้แกนทั้งสองทำมุมกัน 90 องศา โดยที่แกนทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน ในกรณีถ้าแกนทั้ง 3 ไม่ทำมุมฉากซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกน ซึ่งความเป็นมุมฉากและความตรงของแกนการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยความเป็นมุมฉากนั้นจะเกิดจากการตั้งฉากกันของความตรงในของการเคลื่อนที่ สาเหตุหลักที่อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่าง ๆ นั้นอาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนของการประกอบ (Kok *et al.*, 2008) ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่างๆสามารถแทนด้วยสัญลักษณ์คือ S_{ij} เมื่อ $i \neq j$

โดยที่ S_{xy} หมายถึง ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ XY

S_{yz} หมายถึง ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ YZ

S_{xz} หมายถึง ความผิดพลาดของความไม่ฉากในระนาบ XZ

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 13



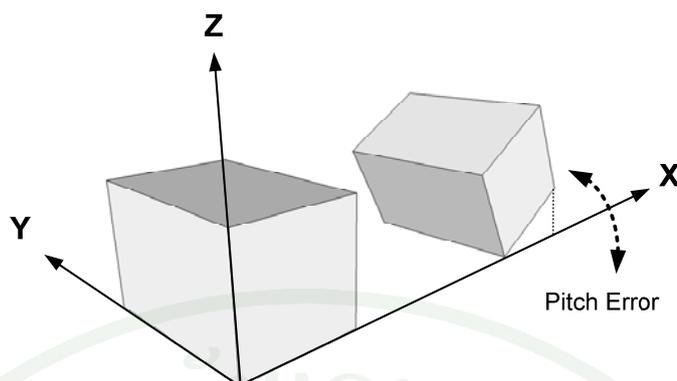
ภาพที่ 13 ความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่างๆ

ที่มา: Raksiri and Parnichkun (2004)

ง. ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ (Angular error)

การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนนั้นจะประกอบด้วยความผิดพลาดเนื่องจากการบิดรอบแกนการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 ความผิดพลาด คือ Pitch Error, Roll Error และ Yaw Error ความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ทั้ง 3 สามารถใช้สัญลักษณ์แทนคือ ε_{ij} โดยที่ ε_{ij} คือ ความผิดพลาดเนื่องจากการบิดเป็นมุมรอบแกน i ในทิศทางการเคลื่อนที่ของแกน j (Raksiri and Parnichkun, 2004)

Pitch คือ การหมุนรอบระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแนวนอนของการเคลื่อนที่ เช่น เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Pitch Error คือ ความผิดพลาดเนื่องจากการบิดภายในระนาบ XZ ดังภาพที่ 14 และ 15 ดังนั้น Pitch Error ในแกนการเคลื่อนที่ต่างๆสามารถแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์ คือ $\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}$

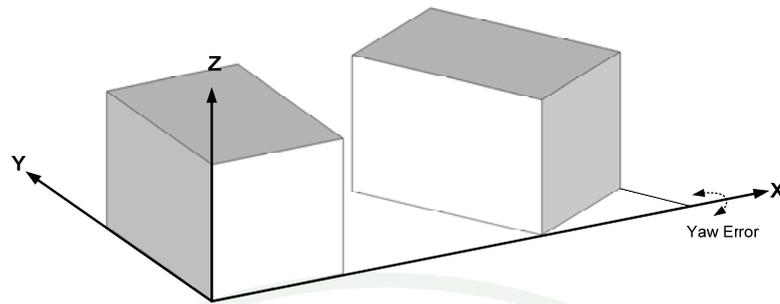


ภาพที่ 14 ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

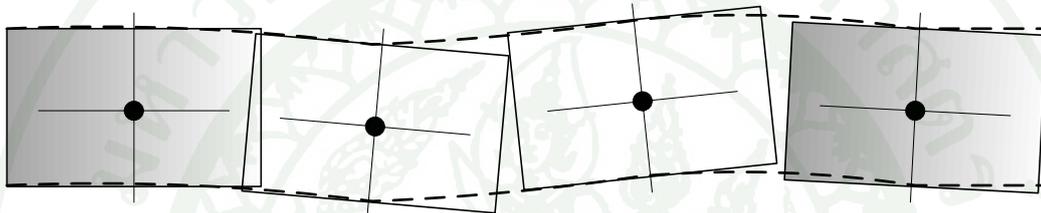


ภาพที่ 15 หนอนรองเครื่องจักรเมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

Yaw คือ การหมุนรอบระนาบแนวนอนของทิศทางเคลื่อนที่ เช่น เมื่อทิศทางเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Yaw Error คือ ความผิดพลาดเนื่องจากการบิดภายในระนาบ XY ดังภาพที่ 16 และ 17 ดังนั้น Yaw Error ในแกนการเคลื่อนที่ต่างๆ สามารถแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์ คือ $\varepsilon_{zx}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{yz}$

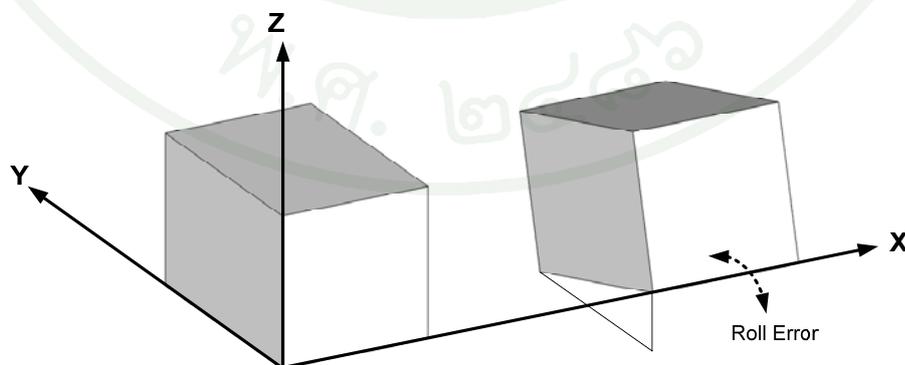


ภาพที่ 16 ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X



ภาพที่ 17 หมอนรองเครื่องจักรเมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

Roll คือ การหมุนรอบทิศทางเคลื่อนที่ เช่น เมื่อทิศทางเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Roll Error คือ ความผิดพลาดเนื่องจากการบิดภายในระนาบ YZ ดังภาพที่ 18 ดังนั้น Roll Error ในแกนการเคลื่อนที่ต่างๆ สามารถแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์ คือ $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$



ภาพที่ 18 ความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

3. การสังเคราะห์รูปแบบความผิดพลาดทางจลนศาสตร์ (Kinematic Error Synthesis Model)

การพัฒนาารูปแบบจลนศาสตร์ (Kinematic Model) บนพื้นฐานของโครงสร้างของเครื่องจักรกลเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร ซึ่งรูปแบบจลนศาสตร์นั้นในช่วงแรกได้ใช้ความสัมพันธ์ด้านตรีโกณมิติ (Leete, 1961) ในการหารูปแบบจลนศาสตร์ แต่ในปัจจุบันได้ใช้ Homogenous Transformation Matrix บนพื้นฐานของวิธีการการสังเคราะห์ความผิดพลาด (Error Synthesis Method) ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย

3.1 Linear Transformations

(Rahman, 2004) เมื่อจุดใดๆเคลื่อนที่ในปริภูมิ (Space) ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปนั้นสามารถที่จะระบุได้ด้วยระยะทางที่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงในระบบแกนพิกัด ซึ่งตำแหน่งของจุดที่เคลื่อนที่ไปนั้นสามารถแสดงด้วยเวกเตอร์คือ $xi + yj + zk$ และยังสามารถแสดงได้ด้วยเมตริกซ์ คือ

$$H = Trans(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ P_x, P_y, P_z เป็นตำแหน่งที่ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z โดยเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงในระบบแกนพิกัด

ในเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกนนั้นจะมีการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแกนทั้งสามคือ X, Y, Z และการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงานด้วย

3.2 Rotation Transformations

เป็นการเปลี่ยนแปลงของระบบแกนพิกัดใหม่ โดยที่แกนนั้นๆหมุนทำมุม θ กับแกนพิกัดเดิม ถ้ากำหนดให้ $X_1 Y_1 Z_1$ เป็นระบบพิกัดใหม่ และ $X Y Z$ เป็นระบบพิกัดเดิม โดยที่ $X_1 Y_1 Z_1$ หมุนทำมุม θ รอบแกน X ซึ่งสามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด X Y Z คือ

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ถ้ากำหนดให้ X1 Y1 Z1 หมุนทำมุม θ รอบแกน Y สามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด X Y Z คือ

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และถ้ากำหนดให้ X1 Y1 Z1 หมุนทำมุม θ รอบแกน Z สามารถหาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด X Y Z คือ

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อสั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปในแนวแกน X ซึ่งจะมีองค์ประกอบความผิดพลาด 6 องค์ประกอบ โดยที่มีความผิดพลาดเชิงเส้น 3 องค์ประกอบ และความผิดพลาดเชิงมุม 3 องค์ประกอบ ซึ่งในทางทฤษฎีเมื่อสั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ตามแกนการเคลื่อนที่ สามารถมีองค์ประกอบความผิดพลาดได้เพียงองค์ประกอบเดียว แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะสามารถเกิดความผิดพลาดได้ทั้งหมด 6 องค์ประกอบ ซึ่งสาเหตุนี้มาจากตำแหน่งปลายของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงานนั้นอยู่ในตำแหน่งที่ผิด

3.3 Homogenous Coordinate Transformation

โดยทั่วไปตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) (Slocum, 1992) ที่เคลื่อนที่ในระบบพิกัดจะมีความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่เชิงมุม 3 องค์ประกอบ ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$) และการเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 องค์ประกอบ ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) โดยที่ความผิดพลาดนี้จะถูกพิจารณาที่ตำแหน่งปลายของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน ถ้าหากแกนการเคลื่อนที่นั้นไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกันแล้ว ย่อมจะทำให้เกิดความ

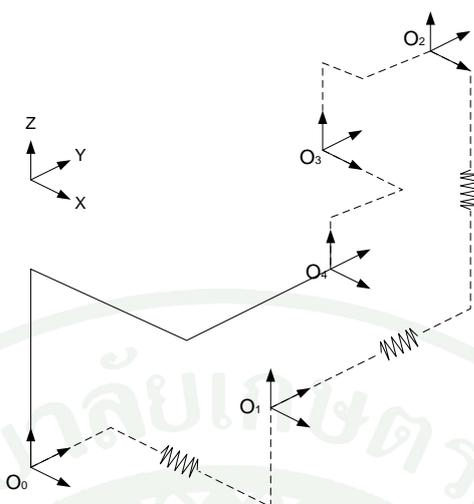
ผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันและความผิดพลาดเชิงมุมขึ้น ถึงแม้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก แต่เราก็ไม่สามารถที่จะไม่พิจารณาได้ เพราะความผิดพลาดเชิงมุมที่มีขนาดเล็กนี้ จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่ามากที่ตำแหน่งปลายของอุปกรณ์ตัดเฉือน ซึ่งจะส่งผลต่อความผิดพลาดของตำแหน่งที่สั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไป

สำหรับชุดแท่นเลื่อน (Carriage) จะใช้ Homogenous Transformation Matrix เพื่ออธิบายผลของความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของชุดแท่นเลื่อน โดยการวิเคราะห์รูปแบบจลนศาสตร์ ซึ่งใช้สมมติฐานในการวิเคราะห์ก็คือ เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Kinematic) และมีการประมาณค่าโดยใช้มุมเล็กๆ (Small Angle Approximation) โดยจะทำให้ความผิดพลาดต่างๆ ให้อยู่ในรูป $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y$ และ ε_z ซึ่งผลลัพธ์จากการใช้ Homogenous Transformation Matrix เพื่ออธิบายความผิดพลาดตำแหน่งที่เคลื่อนที่ของชุดแท่นเลื่อนเทียบกับตำแหน่งที่สั่งให้เคลื่อนที่ไปคือ

$$E_n = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. ความผิดพลาดทางปริมาตรของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

ในการทำนายตำแหน่งที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปจริงเทียบกับตำแหน่ง Nominal นั้นจะทำการใช้ Homogeneous Transformation Matrix ภายใต้สมมติฐานของการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และมีความผิดพลาดเชิงมุมเกิดขึ้นเล็กน้อยระหว่างจุดเชื่อมต่อ (Joint หรือ Link) ซึ่ง Homogeneous Transformation Matrix ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกรอบอ้างอิง (Reference Frame) กับอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool) (Ehmann *et al.*, 1987) ซึ่งสามารถแสดงโดยใช้โซ่จลนศาสตร์ (Kinematic Chain) ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 โซ่จลนศาสตร์ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

จากรูปเป็นการแสดงโซ่จลนศาสตร์ (Kinematic Chain) ของเครื่องกัดแนวตั้งสามแกน ซึ่งตำแหน่งปลายของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool) ที่เคลื่อนที่ไปจริงเทียบกับกรอบอ้างอิง (Reference Frame) สามารถหาได้จากผลคูณของเมตริกซ์การแปลงในระบบแกนพิกัด (Coordinate Transformation Matrix) กับความผิดพลาดเชิงมุมระหว่างจุดเชื่อมต่อ โดยจะเริ่มที่กรอบอ้างอิง (Reference Frame) และจะถูกแปลงไปยังตำแหน่งปลายของอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$[{}^{ref}T_{head}] = [{}^0T_1 E_1] [{}^1T_2 E_2] [{}^2T_3 E_3]$$

เมตริกซ์การแปลงในระบบแกนพิกัดในทุกแกนการเคลื่อนที่และความผิดพลาดเชิงมุมระหว่างจุดเชื่อมต่อของทุกๆ แกนสามารถแสดงได้ดังนี้

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad E_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & \delta_{xy} - S_{xy}y \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy} & \delta_{yy} \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad E_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{xz} - S_{xz}z \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz} & \delta_{yz} - S_{yz}z \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

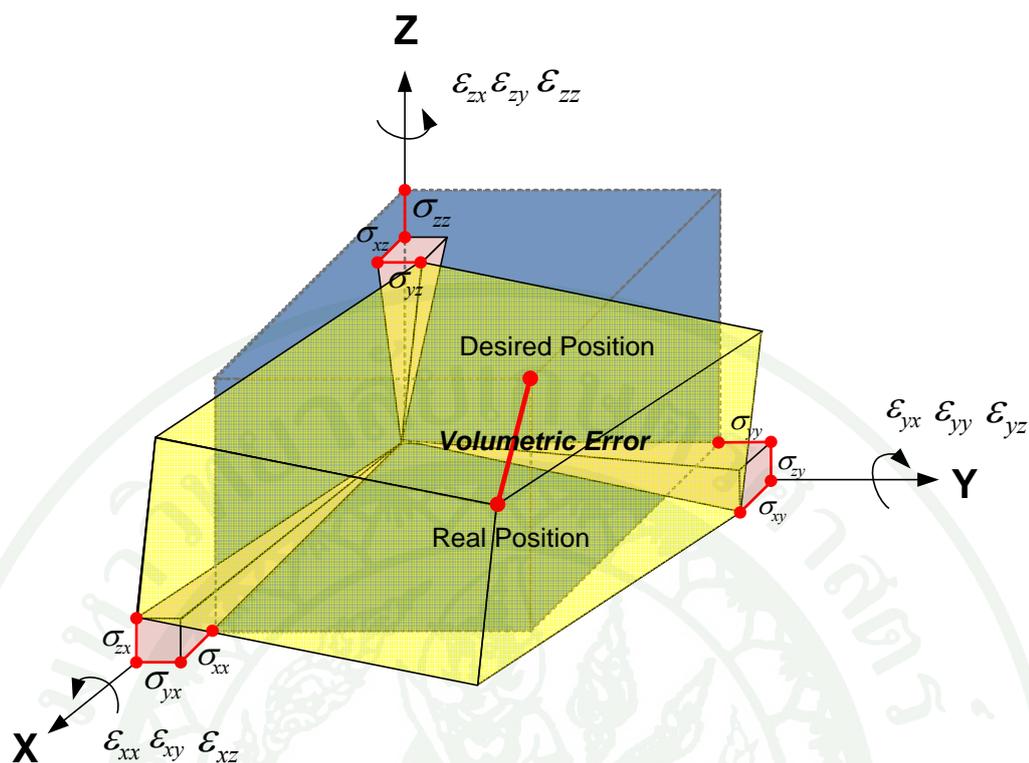
เมื่อทำการคูณเมตริกซ์ข้างต้นและไม่ทำการพิจารณาพจน์ของตัวแปรที่มีกำลังตั้งแต่กำลังสองขึ้นไป จะทำให้ได้ปริมาตรความผิดพลาดของแต่ละแกนรวมถึงองค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} - \varepsilon_{zx}y + \varepsilon_{yx}z + \varepsilon_{yy}z + s_{xy}y \\ &- s_{xz}z - \delta_{yy}\varepsilon_{zx} - \delta_{yz}\varepsilon_{zx} - \delta_{yz}\varepsilon_{zy} + \delta_{zy}\varepsilon_{yx} + \delta_{zz}\varepsilon_{yx} \\ &+ \delta_{zz}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xy}\varepsilon_{zx}z + \varepsilon_{zx}s_{yz}z + \varepsilon_{zy}s_{zy}z \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} - \delta_{zy}\varepsilon_{xx} - \delta_{zz}\varepsilon_{xx} - \delta_{zz}\varepsilon_{xy} + \delta_{xy}\varepsilon_{zx} \\ &- \varepsilon_{zx}s_{xy}y + \delta_{xz}\varepsilon_{zx} - \varepsilon_{zx}s_{xz}z + \delta_{xz}\varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zy}s_{xz}z + \delta_{yz} \\ &- s_{yz}z - \varepsilon_{xx}z - \varepsilon_{xy}z + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zx}z \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_z &= \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + \varepsilon_{xx}y + \delta_{yy}\varepsilon_{xx} - \delta_{xy}\varepsilon_{yx} - \delta_{xz}\varepsilon_{yx} \\ &- \delta_{xz}\varepsilon_{yy} + \delta_{yz}\varepsilon_{xx} + \delta_{yz}\varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xx}\varepsilon_{xy}z - \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yy}z + \varepsilon_{yx}s_{xy}y \\ &- \varepsilon_{xx}s_{yz}z + \varepsilon_{yy}s_{xz}z - \varepsilon_{xy}s_{yz}z + \varepsilon_{yx}s_{xz}z \end{aligned} \quad (3)$$

ปริมาตรความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนนั้นจะเกิดจากการรวมกันขององค์ประกอบความผิดพลาด ซึ่งแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดนั้นจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยที่เมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เกิดขึ้นร่วมกับ Abbe's Error ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการบิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนขึ้น แลสาเหตุที่มาจาก การที่รางนำทางตามแนวแกนมีการบิดเบี้ยวก็จะส่งผลต่อความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่และความผิดพลาดเนื่องจากการเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนเช่นกัน ดังนั้น เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในทุกองค์ประกอบความผิดพลาดในแนวแกน X, Y และ Z จะทำให้ได้ปริมาตรความผิดพลาดดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ความผิดพลาดทางปริมาตรของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

5. การประเมินระบบการวัด

5.1 ความคลาดเคลื่อนในระบบการวัด

เพื่อหาหนทางในการลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบการวัดจึงมีความพยายามในการจำแนกความคลาดเคลื่อนในการวัดออกเป็นหมวดหมู่ โดยทั่วไปจะถูกจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) (อัญญภูมิ, 2554)

5.1.1 ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

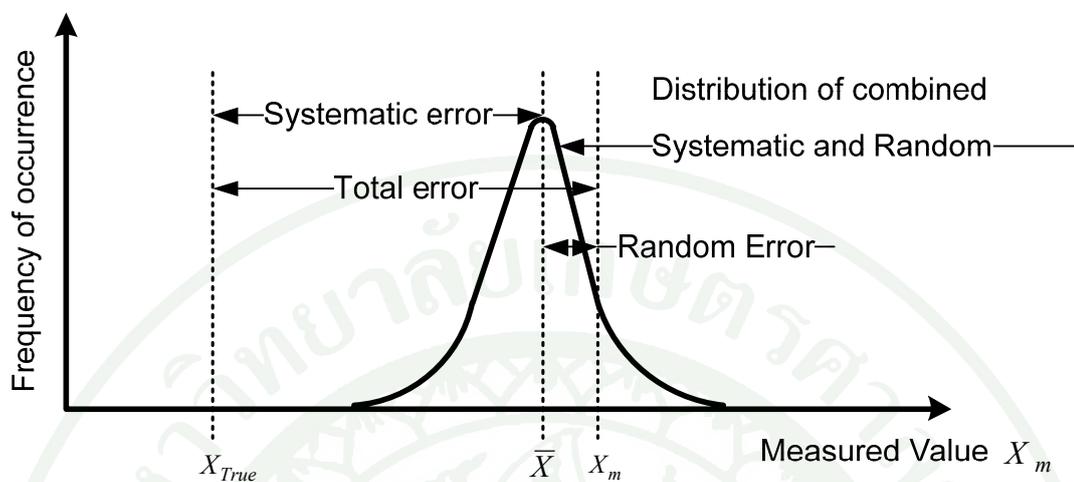
เกิดจากคุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัด สาเหตุอาจเกิดจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การสั่นสะเทือน ความดัน สัญญาณรบกวนที่ปนมากับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องมือวัด หรืออาจเกิดจากคุณสมบัติอันบกพร่องอื่นๆ ของตัวเครื่องมือวัดเอง เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนนี้จะคงอยู่ไม่เปลี่ยนแปลงไปถึงแม้จะทำการวัดซ้ำๆ กันหลายรอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันก็ตาม โดยมีลักษณะการเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่ปริมาณคงเดิม (ในการวัดค่าเดียวซ้ำๆ กัน) และถึงแม้จะทราบแหล่งที่ก่อให้เกิดอยู่บ้าง แต่การหาปริมาณที่แน่นอนจากแต่ละแหล่งเป็นเรื่องที่ยากมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนชนิดนี้ออกไปได้

โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนี้ได้รับการกำหนดค่าโดยผู้ผลิตอุปกรณ์เครื่องมือวัดหรืออาจจะได้จากใบสอบเทียบใบรับรองค่าความคลาดเคลื่อน (Certificate) จากการสอบเทียบเครื่องมือด้วยมาตรฐานที่สูงกว่า

5.1.2 ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

เกิดจากคุณสมบัติด้านความเที่ยงตรง (Precision) ของระบบการวัดอันเนื่องมาจากความผันแปรแบบสุ่มของการสังเกต หรือการตรวจวัดทุกครั้งที่ทำการวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยลักษณะการเกิดขึ้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ทั้งยังไม่มีรูปแบบที่แน่นอนอีกด้วย และในบางครั้งก็อาจจะมีผลจากความผิดพลาดเชิงระบบซึ่งมีรูปแบบการเกิดเป็นช่วงเวลารวมอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น ความผิดพลาดเนื่องจากวิธีการวัด การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมบางขณะซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัด ฯลฯ

ซึ่งความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

ที่มา: Mekid (2009)

6. การประมาณค่าความผิดพลาด

6.1 Error Synthesis model

เป็นการใช้ระบบการวัดที่เหมาะสมเพื่อหาค่าประกอบความผิดพลาด โดยทำการหาความผิดพลาดทั้งหมดแล้วใช้การสังเคราะห์รูปแบบความผิดพลาดด้วยการใช้ Homogenous Transformation Matrix เพื่อหาค่าประกอบความผิดพลาดแต่ละองค์ประกอบ

6.2 Designed Artifact Method

เป็นวิธีการวัดขนาดของชิ้นงานมาตรฐานที่มีขนาดของชิ้นงานที่แน่นอน แล้วนำค่าความแตกต่างที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาค่าประกอบความผิดพลาด ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานมาตรฐานนั้นต้องสอดคล้องเพื่อใช้ในการหาค่าประกอบความผิดพลาดทั้งหมด

6.3 Metrology Method Frame

เป็นการใช้ชุดกระจกหรือระบบการวัดอื่นๆนำไปยึดติดที่เครื่องจักรเพื่อใช้ในการหาค่าความผิดพลาด โดยที่ความผิดพลาดนั้นสามารถถูกแสดงผลและชัดเจนความผิดพลาดได้ในขณะนั้น แต่สามารถแสดงองค์ประกอบความผิดพลาดได้เพียงทีละองค์ประกอบ

6.4 Finite Element Method

ในการสร้างเครื่องจักรนั้นนิยมใช้การวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการหาความผิดพลาดด้วยวิธีนี้จะใช้ Thermo Elastic Deformation และใช้การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อน ภายในโครงสร้างเครื่องจักร โดยจะทำการสร้างภาระที่กระทำกับเครื่องจักร เพื่อหาค่าที่ถูกต้องซึ่งวิธีนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

6.5 Grid Calibration Method

เป็นการเปรียบเทียบความผิดพลาดโดยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือที่วัดกับสิ่งที่จะทำการวัด ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์นั้นๆกับมาตรฐานของงานมาตรฐานระหว่างประเทศ ASME BE.54-1992 จะเป็นวิธีการในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องจักรซีเอ็นซีด้วยเครื่องมือที่แตกต่างกัน เช่น เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์, Electronic Levels , Capacitance Gages

วิธีการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดแบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ วิธี Direct และ วิธี Indirect (Ramesh *et al.*, 2000a) ซึ่งวิธีแบบ Direct นั้นจะทำการวัดด้วยเครื่องมือต่างๆและทำการสร้างรูปแบบความผิดพลาดขึ้นมา ส่วนวิธีแบบ Indirect นั้นจะประมาณค่าจากการวัดปริมาตรความผิดพลาดจากชิ้นงานมาตรฐาน (Artifact) โดยที่จะทราบขนาดของชิ้นงานมาตรฐานนั้นๆและจะทำการประมาณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics) ซึ่งวิธีแบบ Direct นั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำและผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีความชำนาญ ส่วนวิธี Indirect นั้นจะมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มาเกี่ยวข้อง แต่สามารถใช้เครื่องมือที่ง่ายและต้องการข้อมูลที่เพียงพอ

6.5.1 Direct Calibration Method

เป็นวิธีในการประเมินค่าความผิดพลาดจากการวัดด้วยเครื่องมือที่มีความแม่นยำ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือจะสามารถประเมินค่าความผิดพลาดได้แม่นยำ แต่เครื่องมือที่จะใช้ค่อนข้างมีราคาที่สูง ซึ่งแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดจะถูกประเมินความผิดพลาดด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์, Autocollimator, Electronic Level ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การประเมินความผิดพลาดค่าความผิดพลาดด้วยวิธี Direct Calibration Method โดยใช้ เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

6.5.2 Indirect Calibration Method

เป็นวิธีการประเมินค่าความผิดพลาดด้วยชิ้นงานมาตรฐาน(Artifact) หรือจะใช้ บอลบาร์ ซึ่งโดยทั่วไปเราจะไม่สามารถทราบองค์ประกอบความผิดพลาดได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ ข้างต้น แต่เราจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์นั้นมาวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics) (Zhu, 2008) และใช้วิธีการคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด กับองค์ประกอบความผิดพลาด ซึ่งวิธีการนี้จะให้ค่าความแม่นยำน้อยกว่าวิธีแบบ Direct Calibration Method

7. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Laser Interferometer)

งานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบการวัดทางแสงเข้ามาใช้ในการทำการตรวจสอบ เพื่อเปรียบเทียบ ผลจากการหาองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยวิธีจลนศาสตร์ย้อนกลับ โดยจะใช้แสงเลเซอร์ในช่วง ที่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีคุณสมบัติเด่นกว่าแสงทั่วไป คือเป็นแสงโคฮีเรนต์ และให้แสงสีเดียว โดยจะนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ซึ่งเป็นระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบที่เหมาะสมสำหรับงานด้านการตรวจวัดความยาวอย่างละเอียด

โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นและวัดค่าความแตกต่างของเส้นทางเดินแสงที่สัมพันธ์กับจำนวนริ้วจากสัญญาณการแทรกสอด (ในที่นี้จะใช้คำว่า “ฟริ้ง” (Fringe) แทนคำว่า “ริ้ว”) โดยวัดจากค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าและแสดงผลออกมาด้วยเครื่องนับจำนวนฟริ้ง แต่ก่อนที่จะทำการศึกษาระบบการประยุกต์ใช้งานระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์จำเป็นต้องศึกษาหลักการการแทรกสอดของแสงเสียก่อนเนื่องจากเป็นพื้นฐานในการทำ ความเข้าใจถึงระบบการทำงานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (ฐิติภูมิ, 2551)

7.1 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง (Interference of Light)

ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงเป็นคุณสมบัติหนึ่งของแสง เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสอง ขบวนหรือมากกว่าคลื่นที่มาพบกันแล้วซ้อนกันที่ตำแหน่งนั้นๆซึ่งจะไปตามหลักการรวมกัน ได้ของคลื่น (Superposition) โดยหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้จะอาศัยหลักการการแทรก สอดของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกัน (โคฮีเรนต์หมายความว่าคลื่นเหล่านี้จะมีความถี่เท่ากันและมีความต่างเฟสคงที่ตลอดเวลา) การแบ่งประเภทของการแทรกสอดนั้นจะแบ่ง ตามลักษณะของการแยกแสงซึ่งมี 2 วิธี คือ

7.1.1 การแทรกสอดแบบแบ่งหน้าคลื่น

วิธีนี้หน้าคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดหนึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยใช้ กระจกเงาปริซึมหรือเลนส์ช่วย แล้วหน้าคลื่นนั้นจะมารวมกันอีกรอบหลังจากผ่านระยะทาง ต่างๆกันวิธีการนี้ใช้ได้ดีสำหรับแหล่งกำเนิดขนาดเล็กหรือแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดตัวอย่างการทดลอง ที่ใช้วิธีการนี้ เช่น Fresnel's double Mirror, Lloyd's Mirror และการทดลองของยังเป็นต้นแบบ เครื่องมือที่สร้างโดยอาศัยหลักการการแบ่งหน้าคลื่นนี้จะเรียกว่า “Wavefront-splitting Interferometers”

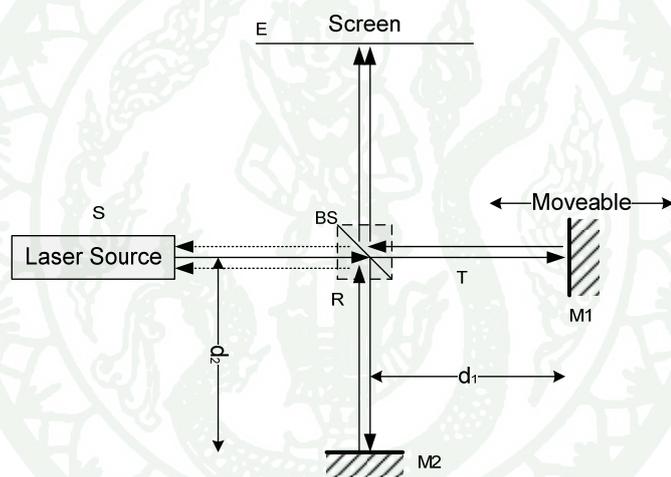
7.1.2 การแทรกสอดแบบการแบ่งแอมพลิจูด

เป็นการแทรกสอดอันเกิดจากคลื่นแสงตกกระทบบนกระจกที่ฉาบเงินบางมาก (Half-Silvered Mirror) คลื่นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านไปอีกส่วนหนึ่งจะ สะท้อนที่ผิวโดยทั้งคลื่นที่ส่งผ่านและคลื่นที่สะท้อนจะมีแอมพลิจูดต่ำกว่าเดิม ถ้าคลื่น 2 ส่วนนี้เป็น โคฮีเรนต์และกลับมารวมกันที่จุดสังเกตจะสามารถเห็นริ้วรอยการแทรกสอดได้อินเตอร์เฟียโร

มิเตอร์แบบแบ่งแอมพลิจูดมีหลายแบบด้วยกันแต่แบบที่รู้จักกันมากที่สุด คือไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

7.2 ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวนเกิดเป็นฟริ้ง แต่ลำแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสง โคเฮียเรนต์และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตเห็นฟริ้งที่เกิดขึ้นได้การอาศัยหลักการทางแสงของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ทำให้สามารถวัดระยะทางในเทอมของความยาวคลื่นได้โดยการนับฟริ้งของคลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกัน



ภาพที่ 23 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ที่มา: จิตติภูมิ (2551)

7.3 หลักการพื้นฐานของไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

จากภาพที่ 23 แหล่งกำเนิดแสงโคเฮียเรนต์เดียวกันลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสง 2 ขบวนด้วย BS ที่วางขวาง 45 องศากับลำแสงลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (Reflected-R) และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน (Transmitted-T) BS ไปลำแสงที่ถูกส่งผ่านจะเดินทางไปตกกระทบกระจก M1 และสะท้อนกลับมายัง BS แล้วแสงส่วนหนึ่งจะหักเหเป็นมุม 90 องศาไปตกกระทบบนฉาก E แสง

อีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังแหล่งกำเนิดแสงส่วนลำแสงจากแหล่งกำเนิดที่สะท้อนจาก BS จะเดินทางไปตามกระทบกระจก M2 และสะท้อนกลับมาอีกครั้งแสงที่สะท้อนจากกระจก M2 ส่วนหนึ่งจะส่งผ่าน BS ไปตกกระทบฉากที่จุด E แสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนไปยังแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองขบวนที่ไปตกกระทบฉากที่จุด E จะเกิดการแทรกสอดกันเป็นฟริ้งจ์ที่ฉาก ซึ่งฟริ้งจ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของกระจก M1 ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของกระจก M1 ได้ภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ที่มา: ลูติภูมิ (2551)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Ramesh et.al. ได้ทำการศึกษางานวิจัยต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรกล โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งของความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องจักรกล และวิธีการในการกำจัดความผิดพลาดนั้นๆ ซึ่งการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นไปที่การวัดความผิดพลาดและการชดเชยความผิดพลาด โดยได้กล่าวถึงวิธีการในการวัดค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรกลไว้หลายๆ วิธี เช่น Grid Calibration Method, Error Synthesis Method, Designed Artifact Method, Metrology Frame Method, Finite Element Method รวมทั้งยังได้กล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนในการชดเชยค่าความผิดพลาดต่างๆ (Ramesh et al., 2000)

Weck ได้ทำการอธิบายองค์ประกอบของความผิดพลาดของเครื่องจักรกลซึ่งมีทั้งหมด 21 องค์ประกอบ ซึ่งในแต่ละแกนจะมีความผิดพลาดเนื่องจากตำแหน่ง 1 องค์ประกอบ, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรง 1 องค์ประกอบ, ความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุม 3 องค์ประกอบ และยังได้ทำการแบ่งประเภทความผิดพลาดแบบ Systematic และวิธีในการวัดค่าความผิดพลาดเหล่านี้ (Weck, 1984)

Ehmann et.al. ได้ทำการสร้างโมเดลความผิดพลาดของเครื่องจักรกลหลายแกน ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานของการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และใช้ Homogenous Transformation Metrics (HTM) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกรอบอ้างอิง (Reference frame) กับอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงาน (Tool) (Ehmann et al., 1987)

Ramesh et.al. ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการผลิต (Thermal Errors) ของเครื่องจักรกล รวมถึงการวัดการจำลองรูปแบบความผิดพลาด และการชดเชยความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีการศึกษาไว้ตั้งแต่ ค.ศ. 1900 (Ramesh et al., 2003)

Sata et.al. ได้ทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเครื่องจักรด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งจะคำนวณความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิภายใต้การกระจายความร้อน (Temperature Distribution) และทำการเปลี่ยนให้เกิดความเครียดของอุณหภูมิกระทำที่จุดต่อ (Nodal Force) (Sata et al., 1974)

Okafor et.al. สร้างโมเดลเพื่อหาปริมาตรความผิดพลาด (Volumetric Error) ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาค่าทั้งความผิดพลาดทางโครงสร้าง (Geometric Error) และ การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนต่างๆอันเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิต (Thermal errors) ของเครื่องจักรแนวตั้งโดยใช้ Homogeneous Transformation Matrix (Okafor *et al.*, 2000)

Soon et.al. ได้ทำการสร้างโมเดลความผิดพลาดของเครื่องจักรกลหลายแกน ซึ่งในการหาความสัมพันธ์จากกรอบอ้างอิง(Reference frame) ไปยังอุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงานด้วยวิธี Direct Kinematic และ Kinematic Chain ซึ่งในแต่ละข้อต่อจะมีความผิดพลาดเนื่องจากตำแหน่งและความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมเกิดขึ้น (Soonns *et al.*, 1992)

Choi et.al. ได้ทำการสร้างโมเดลเพื่อหาปริมาตรความผิดพลาดของเครื่องจักร โดยใช้ Rigid Body Kinematics และ Homogeneous Transformation Matrices ซึ่งโมเดลที่สร้างนี้จะรวมโมเดลของความผิดพลาดที่เกิดจากเพลาหมุนเข้าไปด้วย ซึ่งเมื่อทำการทดสอบโดยการตัดเฉือนสามารถแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดที่เกิดจากเพลาหมุนนั้นได้กับความผิดพลาดอื่นๆด้วย (Choi *et al.*, 2003)

IKua et.al. ได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อทำนายและประมาณการแรงในการตัดเฉือนและความผิดพลาดในการตัดเฉือนพื้นผิวที่เว้าและนูน ซึ่งความผิดพลาดจากแรงในการตัดเฉือนจะถูกคำนวณจากพื้นผิวที่ได้จากการตัดเฉือน (Ikua *et al.*, 2001)

Kim et.al. เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายแรงในการตัดเฉือนและรูปแบบความผิดพลาดของพื้นผิวที่ทำการตัดเฉือนด้วยดอกกัด Ball-End ในหลายๆสถานการณ์ (Kim *et al.*, 2003)

G.H.J. Florussen et.al อธิบายถึงวิธีในการประเมินค่าความผิดพลาดด้านทางด้านรูปร่างและโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ วิธี Parametric ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การวัดโดยใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ ซึ่งจะเป็นการวัดความผิดพลาดทีละแกน โดยที่วิธีการนี้จะให้ความแม่นยำสูง แต่จะใช้เวลาในการประเมินค่าความผิดพลาดนาน ซึ่งอีกวิธีการหนึ่งจะเป็นการใช้ Artifact ในการประเมินค่าความผิดพลาด เช่น Hole Plates หรือ Ball Plates, Ball Cubes, Ball Bars, Step Gauges เป็นต้น ซึ่งการประเมินค่าความผิดพลาดนั้นจะเป็นการประเมินจากความแตกต่างของการวัดกับชิ้นงานที่ทราบขนาดที่แน่นอน (Florussen *et al.*, 2001)

Mou และ Lui ได้ศึกษาการประเมินค่าความผิดพลาดโดยใช้ Artifact ซึ่งใช้ชิ้นงานมาตรฐาน (Reference Part) ซึ่งมีความแตกต่างกัน 4 แบบในการพิจารณาค่าความผิดพลาด โดยที่ชิ้นงานมาตรฐานทั้งหมดอยู่ในรูปแบบ 2D Contour (Mou and Lui, 1995)

Zhang และ Zang ได้ทำการใช้ 1-D Array Ball ในการวัดความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักร (Zhang and Zang, 1991)

Kruth et al. เสนอวิธีการในการหาความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแนวแกนโดยการใช้ Single Properly Sized Artifact (Kruth et al., 1994)

Chen และ Ling ได้ใช้ Artifact สร้างแบบจำลองความผิดพลาดของตำแหน่งของการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม Contouring Error (Chen and Ling, 1996)

Bryan ได้ทำการออกแบบ Magnetic Ball Bars และได้ทำการพัฒนาทฤษฎีและวิธีการในการเลือกความผิดพลาดของตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการนี้จะให้ความแม่นยำและรวดเร็ว (Bryan, 1982a, 1982b)

Knapp ได้ทำการพัฒนา Circular Test เพื่อใช้ในการหาค่าความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักร 3 แกน (Knapp, 1983)

Huh et al. เสนอวิธีการต่างๆในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของเครื่องจักรและความผิดพลาดของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิต (Part Error) ซึ่งถูกเรียกว่า Machine Part Error Mapping Model ซึ่งโมเดลนี้สามารถที่จะระบุพารามิเตอร์ของเครื่องจักรผ่านทางความผิดพลาดของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตเพื่อที่จะนำพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ไปชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร (Huh and Yuan, 1999)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ไม้เทียมสังเคราะห์ ขนาด 500×500×100 มิลลิเมตร

ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุดังนี้

Density	0.7	g/cm ³
Heat Distortion (ISO 75)	75-80	C°
Coefficient of thermal expansion (ISO 11359)	50 -55	10 ⁻⁶ K ⁻¹
Flexural strength (ISO 178)	25-30	MPa
Compressive strength (ISO 604)	20-25	MPa
Compressive modulus (ISO 604)	910-960	MPa
Shore-D-Hardness (ISO 868)	60-65	

2. มีดกัดชิ้นงาน



ภาพที่ 25 มีดกัดชิ้นงานที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานมาตรฐาน

คุณลักษณะของมีดกัด

ยี่ห้อ	STK	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	14	มิลลิเมตร
ความยาวคมกัด	35	มิลลิเมตร
ความยาวของมีดกัด	90	มิลลิเมตร
จำนวนฟันกัด	4	ฟัน

3. เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน CHEVALIER รุ่น 2040 VMC



ภาพที่ 26 เครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน

4. เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (Coordinate Measuring Machines, CMMs) รุ่น PMM C-700

BROWN&SHARPE



ภาพที่ 27 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

คุณลักษณะของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

ยี่ห้อ

Brown & Sharpe

ชนิดของเครื่อง

Fix Bridge

ระยะในการทำงาน

X = 1200 มิลลิเมตร

X = 1000 มิลลิเมตร

X = 700 มิลลิเมตร

ค่าความแม่นยำ

$[0.6 + (L/600)] \mu\text{m}$

ค่าความไม่แน่นอน

$\sqrt{(0.52)^2 + (1.4 \times 10^{-3} \times L)^2} \mu\text{m}$

5. ชุดอุปกรณ์เลเซอร์ของ Renishaw รุ่น ML 10 ซึ่งประกอบไปด้วย

5.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (ML 10 Measurement Laser Generate)



ภาพที่ 28 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ของ Renishaw รุ่น ML 10

5.2 อุปกรณ์ชดเชยความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอันเกิดจากปัจจัยอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ (EC10 Environmental Compensation Unit)



ภาพที่ 29 ชุดชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยสภาวะแวดล้อม

5.3 กระจกสำหรับการสะท้อนและการแทรกสอดของแสงเลเซอร์
(Linear Measurement Mirror Kid)



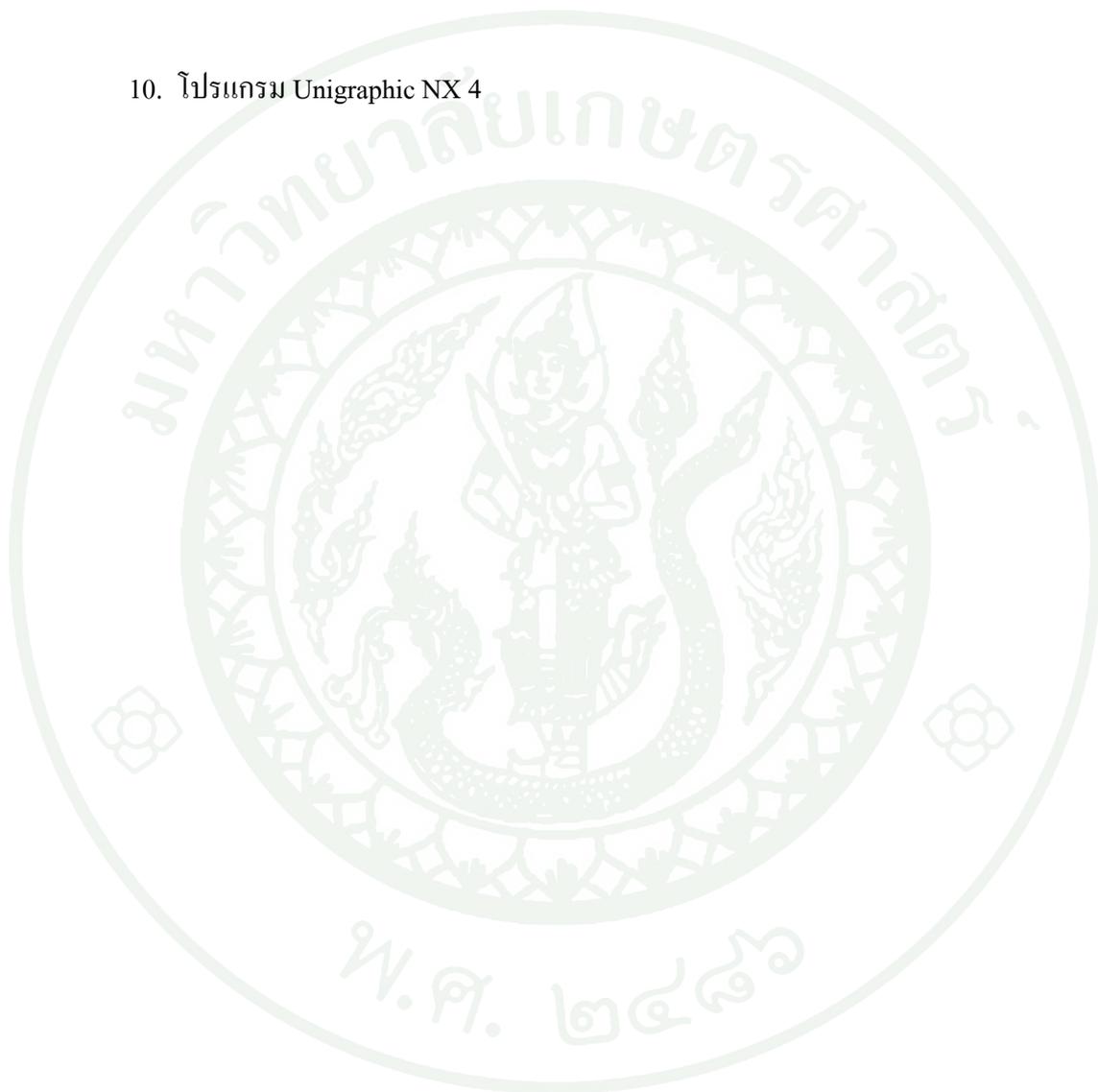
ภาพที่ 30 กระจกสะท้อนและแทรกสอดแสงเลเซอร์

6. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูลของชุดอุปกรณ์เลเซอร์



ภาพที่ 31 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูล

7. เครื่องคอมพิวเตอร์
8. โปรแกรม Solid Edge เวอร์ชัน19
9. โปรแกรม Wolfram Mathematica เวอร์ชัน7
10. โปรแกรม Unigraphics NX 4



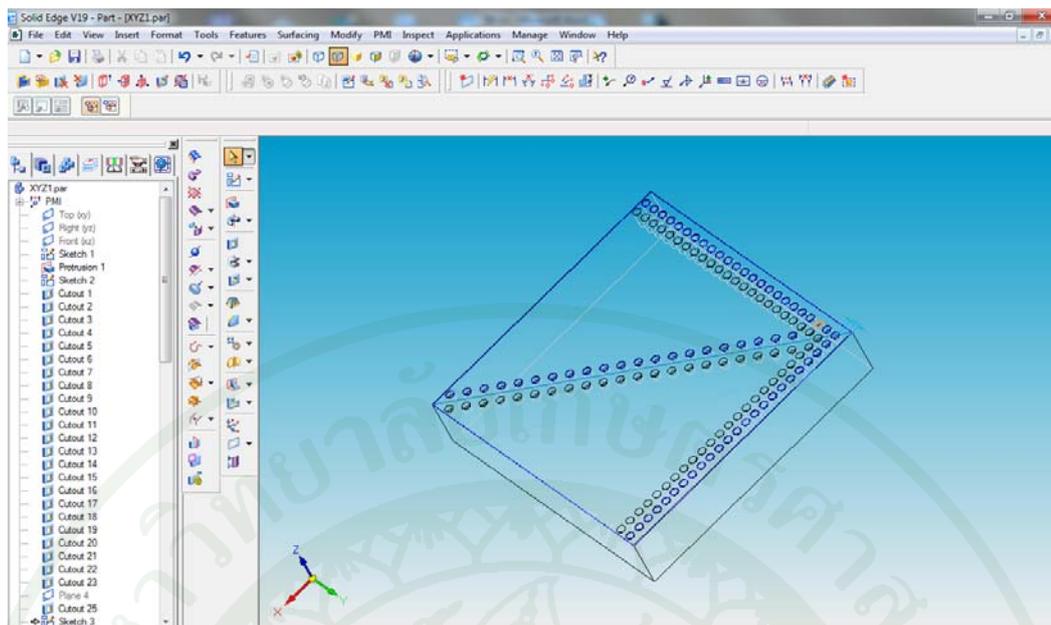
วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน (CHEVALIER รุ่น 2040 VMC) ของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ด้วยวิธีการตัดเฉือนชิ้นงานมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

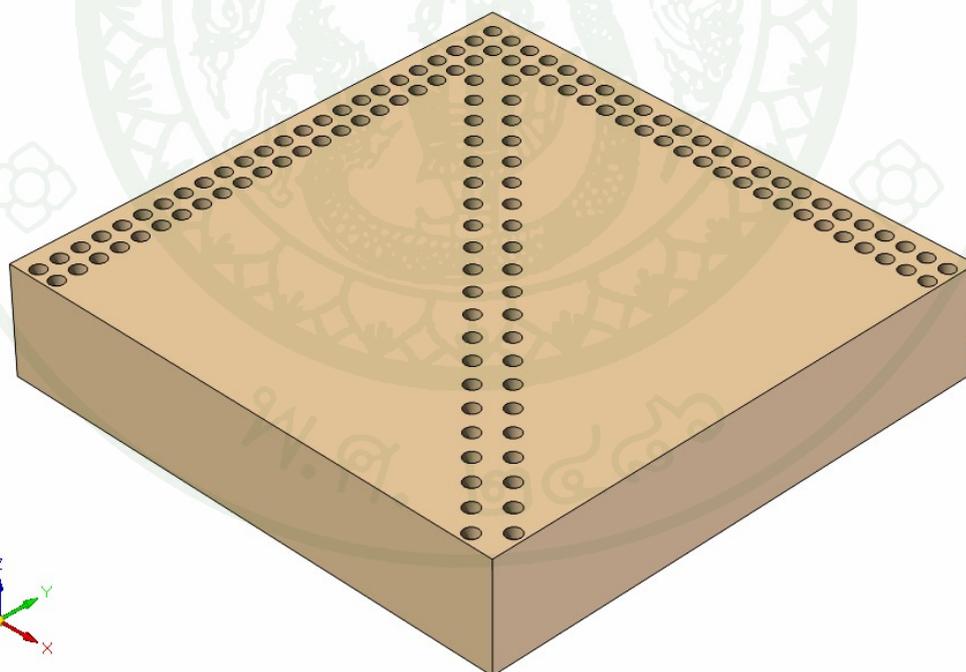
1. การออกแบบชิ้นงานมาตรฐาน

ในการออกแบบชิ้นงานมาตรฐานเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนได้นั้นจำเป็นที่จะต้องออกแบบเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดที่ไม่ทราบค่า รวมทั้งยังจะต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆที่อาจจะมีผลในการหาค่าความผิดพลาดดังกล่าวด้วย ซึ่งชิ้นงานมาตรฐานนั้นควรมีรูปแบบที่ง่าย เพื่อที่จะช่วยลดระยะเวลา รวมถึงต้นทุนที่จะเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นเราเลือกที่จะทำการตัดเฉือนชิ้นงานโดยการเจาะรู เพราะว่าการเจาะรูนั้นเครื่องจักรจะเคลื่อนที่เพียงแกนๆเดียว และผลซึ่งเกิดจากแรงในการตัดเฉือนชิ้นงานนั้นจะมีน้อย ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดดังกล่าวลง

ในการออกแบบชิ้นงานมาตรฐานนั้น ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Edge เวอร์ชัน 19 ซึ่งชิ้นงานที่ทำการออกแบบมีขนาด $500 \times 500 \times 100$ มิลลิเมตร และทำการออกแบบการเจาะในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งมีความลึกที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร ถึง 32 มิลลิเมตร โดยที่ความลึกในแต่ละรูมีความแตกต่างกัน 1 มิลลิเมตร ส่วนในแนวแกน Z นั้นจะมีค่าความลึกที่คงที่คือ 10 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 32 และ 33



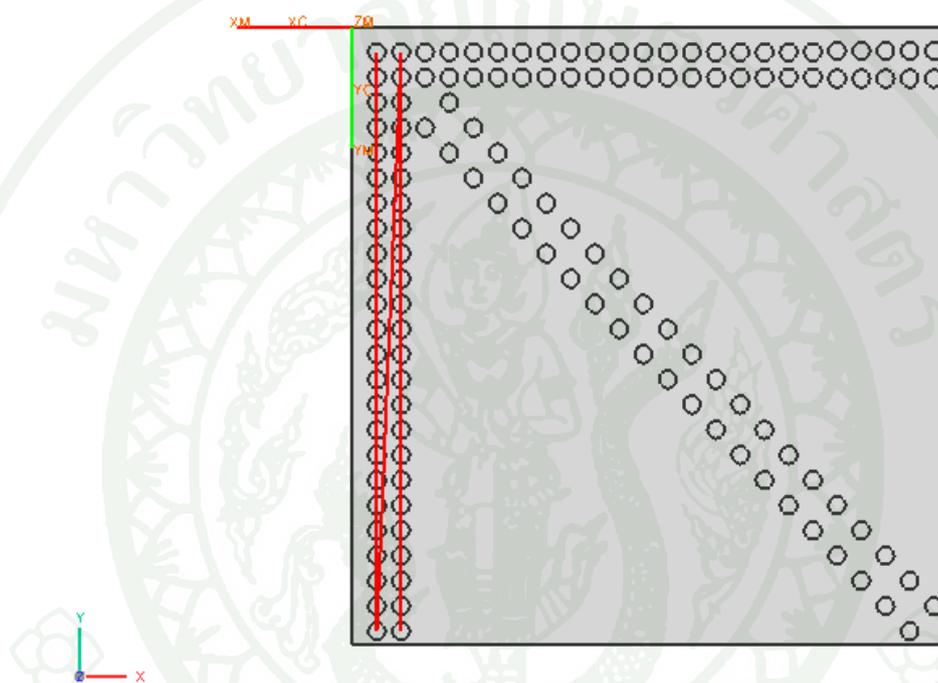
ภาพที่ 32 การออกแบบชิ้นงานมาตรฐานโดยใช้โปรแกรม Solid Edge



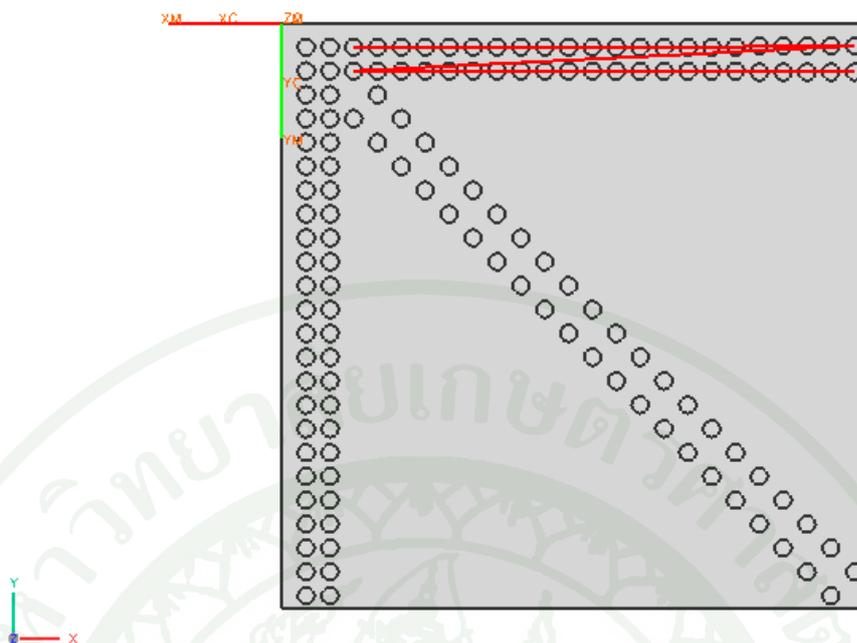
ภาพที่ 33 ชิ้นงานมาตรฐาน

1.1 การสร้างเส้นทางการเดินของมิดกัต

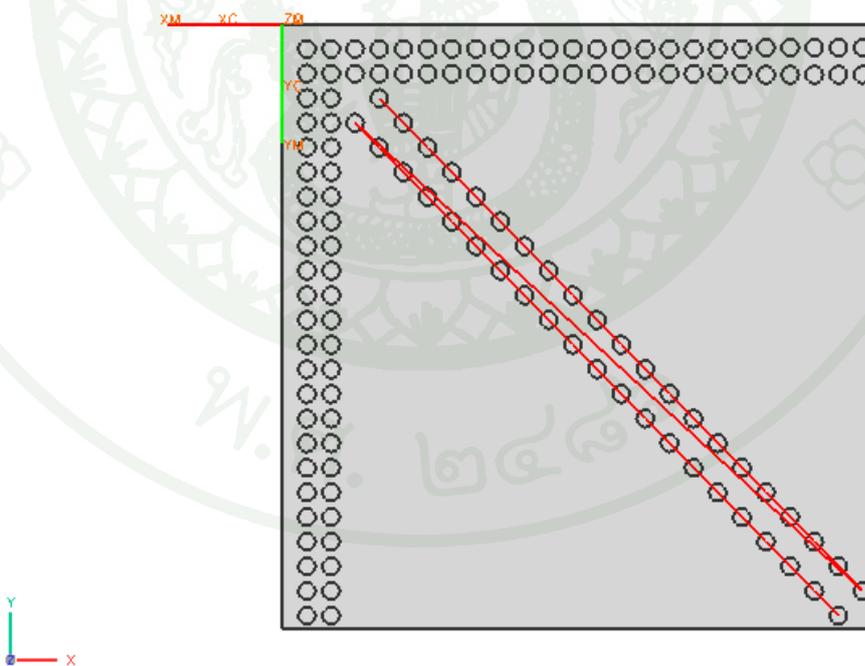
เมื่อทำการออกแบบชิ้นงานมาตรฐานโดยใช้โปรแกรม Solid Edge แล้ว ก็จะทำให้การกำหนดเส้นทางการเดินของมิดกัตโดยใช้โปรแกรม Unigraphics ในโหมด Manufacturing ซึ่งในการกำหนดเส้นทางการเดินของมิดกัตนั้นจะทำการเดินเส้นทางการกัด (เส้นสีแดง) ทีละแกนซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพ 34, 35 และ 36



ภาพที่ 34 เส้นทางการเดินของมิดกัตเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ YZ



ภาพที่ 35 เส้นทางการเดินของมิดก๊ัดเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ XZ



ภาพที่ 36 เส้นทางการเดินของมิดก๊ัดเพื่อทำการเจาะรูในระนาบ XY

เมื่อทำการกำหนดเส้นทางการเดินของมิดกัตเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการแปลงเส้นทางการกัตดังกล่าวให้กลายเป็นจีโค้ด (G Code) แล้วนำจีโค้ดไปป้อนเข้าเครื่องกัตซีเอ็นซีเพื่อทำการกัตต่อไป ซึ่งตำแหน่งของรูในระบบพิกัดของชิ้นงาน (X,Y,Z) นั้นจะถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่ง Nominal ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีค่าความผิดพลาดใดๆเกิดขึ้น

2. การตัดเนื้อชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องกัตซีเอ็นซี 3 แกน

ชิ้นงานมาตรฐานนั้นได้กัตโดยใช้เครื่องกัตซีเอ็นซี 3 แกน CHEVALIER รุ่น 2040 VMC ของสถาบันคั้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งในกระบวนการกัตควรที่จะลดปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นเพื่อให้เหลือแต่ความผิดพลาดที่ต้องการวัดจากชิ้นงานมาตรฐานนั้นเท่านั้น (Banacha, 2002) ซึ่งสิ่งที่สำคัญมากในขณะกัตชิ้นงานนั้นควรที่จะกำจัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ซึ่งไม่สามารถทำการชดเชยค่าความผิดพลาดนั้นได้ ดังนั้นจึงควรใช้อัตราป้อนที่ต่ำและคงที่, ความเร็วรอบที่สูง, เส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ตัดเนื้อที่มีขนาดใหญ่ และควรยึดชิ้นงานมาตรฐานให้แน่น ซึ่งวิธีดังกล่าวจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่าน้อยที่สุด

ในขั้นตอนการกัตชิ้นงานมาตรฐานได้ทำการกัตโดยใช้ความเร็วในการตัดเนื้อ 100 mm/min ความเร็วรอบ 2000 RPM และใช้ดอกกัตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร ซึ่งก่อนทำการกัตชิ้นงานมาตรฐานนั้น ได้ทำการเตรียมชิ้นงานโดยการกัตผิวชิ้นงานด้านข้างเพื่อให้มีความเรียบเท่ากัน และทำการกำหนดจุดอ้างอิงของชิ้นงานโดยใช้ผิวด้านข้างเป็นตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่งอ้างอิงในแกน X และ Y หลังจากนั้นทำการกัตที่ผิวหน้าของชิ้นงานแล้วทำการกำหนดจุดอ้างอิงที่ผิวของชิ้นงานในแกน Z

เมื่อได้ตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงานแล้ว (X,Y,Z) ก็จะเริ่มทำการกัตตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะให้แทนเครื่องจักรเคลื่อนไปที่ตำแหน่งจุดอ้างอิงของเครื่องจักรก่อนที่จะเริ่มกัตในรูแรก เมื่อเคลื่อนที่ไปจุดอ้างอิงของเครื่องจักรแล้ว ก็จะเริ่มทำการเจาะโดยที่มิดกัตจะเคลื่อนที่ไปในระนาบ YZ ดังภาพที่ 34 และเมื่อทำการเจาะถึงรูสุดท้ายแล้ว ก็จะให้แทนเครื่องจักรเคลื่อนไปที่ตำแหน่งจุดอ้างอิงของเครื่องจักรอีกครั้งแล้วก็เริ่มทำการเจาะในแถวที่สองต่อไป เมื่อเจาะในระนาบ YZ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการเจาะโดยให้มิดกัตเคลื่อนที่ในระนาบ XZ และระนาบ XY ต่อไป ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการกัตได้ดังภาพที่ 35 และ 36 และเมื่อทำการกัตตามขั้นตอนต่างๆ ตามที่

ได้ออกแบบไว้ก็จะได้ชิ้นงานมาตรฐาน เพื่อนำไปวัดเพื่อหาค่าประกอบความผิดพลาดต่างๆต่อไป ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการกัดชิ้นงานมาตรฐาน ได้ดังภาพที่ 37 และภาพที่ 38



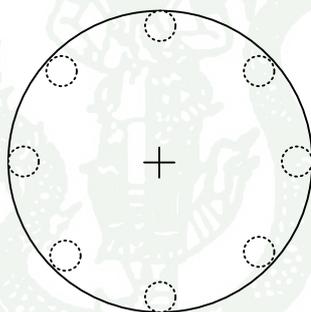
ภาพที่ 37 ขั้นตอนการกัดชิ้นงานมาตรฐาน



ภาพที่ 38 ชิ้นงานมาตรฐานที่ทำการกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

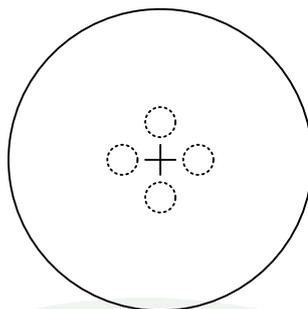
3. วัดชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ

ในการวัดเพื่อหาตำแหน่งรูเจาะของชิ้นงานมาตรฐานนั้นจะใช้เครื่องวัดพิทัก 3 มิติ รุ่น PMM C-700 BROWN&SHARPE ของห้องปฏิบัติการซีเอ็มเอ็มและเกียร์ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนที่ใช้ทำการทดลอง (CHEVALIER รุ่น 2040 VMC) ซึ่งข้อมูลของตำแหน่งของรูที่ทำการวัดจะถูกประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซึ่งตำแหน่งของรูที่ทำการเจาะที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ในระบบพิทักชิ้นงาน ตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งที่ได้จากการกัดชิ้นงานจริง (X', Y', Z') ซึ่งในขั้นตอนการวัดนั้นจะทำการวัดเพื่อหาพิทักของตำแหน่งในแกน XY โดยจะนำหัววัด (Prob) มาแตะที่ขอบของรูเจาะ 8 ตำแหน่ง แล้วนำค่าของตำแหน่งดังกล่าวไปคำนวณหาจุดศูนย์กลางของวงกลม ดังภาพที่ 39 ซึ่งสามารถทราบตำแหน่งพิทักของรูในระนาบ XY



ภาพที่ 39 การวัดเพื่อหาพิทักในระนาบ XY

เมื่อทราบพิทักของตำแหน่งในระนาบ XY แล้ว ก็จึงจะทำการวัดความลึกของรูเจาะที่เป็นค่าในแกน Z ซึ่งในการวัดค่าในแกน Z นั้น เราจะทำการวัดโดยเคลื่อนหัววัดให้ออกห่างจากจุดศูนย์กลางวงกลม 2 มิลลิเมตร แล้วทำการวัดตำแหน่งความลึกของรู 4 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 40 แล้วข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ จากขั้นตอนการวัดดังกล่าวจะทำให้ทราบพิทักของรูเจาะ (X, Y, Z) ซึ่งพิทักดังกล่าวก็คือตำแหน่งที่ได้จากการเจาะชิ้นงานมาตรฐาน (X', Y', Z') นั้นเอง



ภาพที่ 40 การวัดเพื่อหาพิกัดในแนวแกน Z

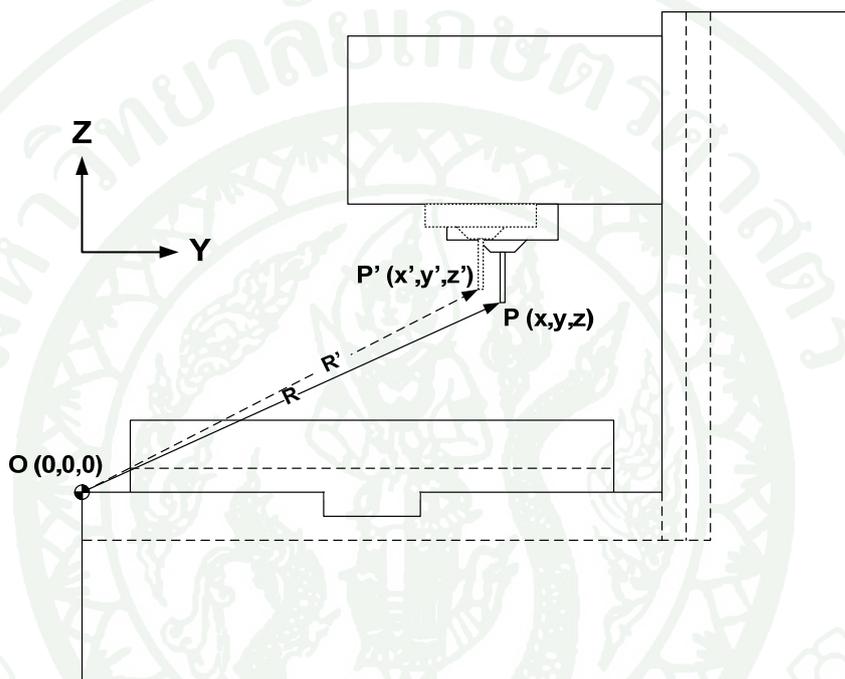
ในการวัดเพื่อหาพิกัดของตำแหน่งรูเจาะ (X,Y,Z) จะทำการวัดตามลำดับ (ภาคผนวกที่ ค) ซึ่งข้อมูลในการวัดตามตำแหน่งดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังภาคผนวกที่ ค และขั้นตอนการวัดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ขั้นตอนการวัดชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

4. การวิเคราะห์รูปแบบขององค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักร

ในการศึกษาเพื่อทำการหาค่าความผิดพลาดของเครื่องซีเอ็นซี 3 แกน (CHEVALIER รุ่น 2040 VMC) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 26 เราจะนำวิธีการหาองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ โดยการพิจารณาความแตกต่างของความยาว (ΔR)



ภาพที่ 42 ตำแหน่งที่ตั้งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปและตำแหน่งที่เกิดจากความผิดพลาดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

จากภาพที่ 42 กำหนดให้จุด $O(0,0,0)$ เป็นตำแหน่งอ้างอิง และเมื่อตั้งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง $P(x,y,z)$ แต่ถ้าหากเครื่องจักรมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จะทำให้ตำแหน่งที่ตั้งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปเปลี่ยนไปเป็น $P'(x',y',z')$ ซึ่งจากตำแหน่งอ้างอิงไปยังตำแหน่ง $P(x,y,z)$ มีความยาวเท่ากับ R ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

และจากตำแหน่งอ้างอิงไปยังตำแหน่ง $P'(x', y', z')$ มีความยาวเท่ากับ R' สามารถหาได้จาก

$$R' = \sqrt{(x'^2 + y'^2 + z'^2)} = \sqrt{(x + \Delta V_x)^2 + (y + \Delta V_y)^2 + (z + \Delta V_z)^2} \quad (3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} X' &= X + \Delta V_x \\ Y' &= Y + \Delta V_y \\ Z' &= Z + \Delta V_z \end{aligned} \quad (4)$$

ซึ่ง $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$ คือ องค์ประกอบความผิดพลาดทางปริมาตรของตำแหน่ง $P(x, y, z)$ เทียบกับตำแหน่ง $P'(x', y', z')$ ดังนั้นความแตกต่างของระยะทางทั้งสอง (ΔR) สามารถหาได้จาก นำสมการที่ 2 ลบด้วยสมการที่ 3 จะได้

$$\begin{aligned} \Delta R &= R' - R = \sqrt{(x + \Delta V_x)^2 + (y + \Delta V_y)^2 + (z + \Delta V_z)^2} - R \\ (\Delta R + R) &= \sqrt{(x + \Delta V_x)^2 + (y + \Delta V_y)^2 + (z + \Delta V_z)^2} \\ (\Delta R + R)^2 &= (x + \Delta V_x)^2 + (y + \Delta V_y)^2 + (z + \Delta V_z)^2 \\ \Delta R^2 + 2\Delta R R + R^2 &= (x^2 + 2x\Delta V_x + \Delta V_x^2) + (y^2 + 2y\Delta V_y + \Delta V_y^2) + (z^2 + 2z\Delta V_z + \Delta V_z^2) \end{aligned}$$

ซึ่ง $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ และ $\Delta R^2 = \Delta V_x^2 + \Delta V_y^2 + \Delta V_z^2$ จะได้

$$\Delta R R = x\Delta V_x + y\Delta V_y + z\Delta V_z$$

หาร R ทั้งสองด้านจะได้

$$\Delta R = \Delta V_x \left(\frac{x}{R}\right) + \Delta V_y \left(\frac{y}{R}\right) + \Delta V_z \left(\frac{z}{R}\right) \quad (5)$$

ซึ่งจากสมการที่ 5 จะให้ความแตกต่างของความยาว เมื่อมีองค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆเกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่จากตำแหน่ง O ไปยังตำแหน่ง P ซึ่งจะใช้วิธีการดังกล่าวในการวิเคราะห์รูปแบบขององค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องจักร ซึ่งองค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆนั้นจะถูกแสดงด้วยสมการโพลีโนเมียล (Polynomial) คือ

ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่

$$\delta_{uu} = \sum_{k=1}^p (d_{uu})_k v^k \quad (6)$$

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่

$$\delta_{uv} = \sum_{k=1}^p (d_{uv})_k v^k \quad (7)$$

ความผิดพลาดเนื่องจากการบิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่

$$\varepsilon_{uv} = \sum_{k=1}^p (e_{uv})_k v^k \quad (8)$$

โดยที่ $u, v = X, Y, Z$ ซึ่ง $(d_{uv})_k$ และ $(e_{uv})_k$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียล

4.1 วิธีการหาค่าประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{yy}, \delta_{yz}, \delta_{zy}, \delta_{zz}$

ในการหาค่าประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{yy}, \delta_{yz}, \delta_{zy}, \delta_{zz}$ จะทำการทดลองในระนาบ YZ โดยที่จะไม่ทำการพิจารณาค่าในแนวแกน X ดังนั้นองค์ประกอบความผิดพลาดทางปริมาตรในแนวแกน X จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งในการทดลองเพื่อหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{yy}, \delta_{yz}, \delta_{zy}, \delta_{zz}$ จะทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดทางปริมาตรเฉพาะ ΔV_y และ ΔV_z ซึ่งจะมีผลต่อความแตกต่างของความยาวทั้งสอง (ΔR) คือ

$$\Delta R = \Delta V_y \left(\frac{Y}{R} \right) + \Delta V_z \left(\frac{Z}{R} \right) \quad (9)$$

ปริมาตรความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแกน Y และ Z นั้นจะเกิดจากการรวมกันขององค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2) และ (3) และจะทำการกำจัดองค์ประกอบความผิดพลาดที่ไม่เกี่ยวข้องซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\Delta V_y &= \delta_{yy} + \delta_{yz} \\ \Delta V_z &= \delta_{zy} + \delta_{zz}\end{aligned}\quad (10)$$

องค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆจะถูกแสดงด้วยสมการโพลิโนเมียล (Polynomial) ซึ่งในการทดลอง เราจะทำการใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองในการพิจารณา ดังนั้นแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดสามารถแสดงได้คือ

$$\begin{aligned}\delta_{yy} &= (d_{yy})_2 y^2 + (d_{yy})_1 y \\ \delta_{yz} &= (d_{yz})_2 z^2 + (d_{yz})_1 z \\ \delta_{zy} &= (d_{zy})_2 y^2 + (d_{zy})_1 y \\ \delta_{zz} &= (d_{zz})_2 z^2 + (d_{zz})_1 z\end{aligned}\quad (11)$$

นำสมการที่ 11 แทนลงในสมการที่ 10 จะได้

$$\begin{aligned}\Delta V_y &= (d_{yy})_2 y^2 + (d_{yy})_1 y + (d_{yz})_2 z^2 + (d_{yz})_1 z \\ \Delta V_z &= (d_{zy})_2 y^2 + (d_{zy})_1 y + (d_{zz})_2 z^2 + (d_{zz})_1 z\end{aligned}\quad (12)$$

นำสมการที่ 12 ไปในสมการที่ 9 จะได้

$$\begin{aligned}\Delta R &= (d_{yy})_2 y^2 \left(\frac{y}{R}\right) + (d_{yy})_1 y \left(\frac{y}{R}\right) + (d_{yz})_2 z^2 \left(\frac{y}{R}\right) + (d_{yz})_1 z \left(\frac{y}{R}\right) \\ &+ (d_{zy})_2 y^2 \left(\frac{z}{R}\right) + (d_{zy})_1 y \left(\frac{z}{R}\right) + (d_{zz})_2 z^2 \left(\frac{z}{R}\right) + (d_{zz})_1 z \left(\frac{z}{R}\right)\end{aligned}\quad (13)$$

โดยที่ $(d_{mn})_k$ แทนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการโพลิโนเมียล
 ΔR_i เป็นความแตกต่างของระยะทางทั้งสองที่ตำแหน่งที่ i

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{yy}, \delta_{yz}, \delta_{zy}, \delta_{zz}$

องค์ประกอบความผิดพลาด	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณา	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 13
δ_{yy}	$(d_{yy})_1$	$y(\frac{y}{R})$
	$(d_{yy})_2$	$y^2(\frac{y}{R})$
δ_{yz}	$(d_{yz})_1$	$z(\frac{y}{R})$
	$(d_{yz})_2$	$z^2(\frac{y}{R})$
δ_{zy}	$(d_{zy})_1$	$y(\frac{z}{R})$
	$(d_{zy})_2$	$y^2(\frac{z}{R})$
δ_{zz}	$(d_{zz})_1$	$z(\frac{z}{R})$
	$(d_{zz})_2$	$z^2(\frac{z}{R})$

จากตารางที่ 3 จะแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณา และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 13 ซึ่งมีสมการที่ไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 8 สมการ ดังนั้นหากต้องการแก้สมการดังกล่าว จะต้องมีความแตกต่างของตำแหน่งของรูเจาะเท่ากับหรือมากกว่า 8 ตำแหน่ง เพื่อทำการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว โดยที่ความแตกต่างของตำแหน่งสามารถสร้างได้จากการเจาะรูที่ขึ้นงานมาตรฐาน

4.2 วิธีการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{xx}, \delta_{xz}, \delta_{zx}$

ในการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{xx}, \delta_{xz}, \delta_{zx}$ สามารถพิจารณาได้จากการทดลองโดยการเจาะในระนาบ XZ โดยที่จะไม่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดในแนวแกน Y ซึ่งในการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{xx}, \delta_{xz}, \delta_{zx}$ จะทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดทางปริมาตรเฉพาะ ΔV_x และ ΔV_z ซึ่งจะมีผลต่อความแตกต่างของความยาวทั้งสอง (ΔR) คือ

$$\Delta R = \Delta V_x \left(\frac{x}{R}\right) + \Delta V_z \left(\frac{z}{R}\right) \quad (14)$$

ปริมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแกน X และ Z นั้นจะเกิดจากการรวมกันขององค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (3) และจะทำการกำจัดองค์ประกอบความผิดพลาดที่ไม่เกี่ยวข้องออกซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\Delta V_x &= \delta_{xx} + \delta_{xz} \\ \Delta V_z &= \delta_{zx} + \delta_{zz}\end{aligned}\quad (15)$$

องค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆจะถูกแสดงด้วยสมการโพลิโนเมียล (Polynomial) ซึ่งในการทดลอง เราจะทำการใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองในการพิจารณา ดังนั้นแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดสามารถแสดงได้คือ

$$\begin{aligned}\delta_{xx} &= (d_{xx})_2 x^2 + (d_{xx})_1 x \\ \delta_{xz} &= (d_{xz})_2 z^2 + (d_{xz})_1 z \\ \delta_{zx} &= (d_{zx})_2 x^2 + (d_{zx})_1 x \\ \delta_{zz} &= (d_{zz})_2 z^2 + (d_{zz})_1 z\end{aligned}\quad (16)$$

นำสมการที่ 16 แทนลงในสมการที่ 15 จะได้

$$\begin{aligned}\Delta V_x &= (d_{xx})_2 x^2 + (d_{xx})_1 x + (d_{xz})_2 z^2 + (d_{xz})_1 z \\ \Delta V_z &= (d_{zx})_2 x^2 + (d_{zx})_1 x + (d_{zz})_2 z^2 + (d_{zz})_1 z\end{aligned}\quad (17)$$

นำสมการที่ 17 ไปในสมการที่ 14 จะได้

$$\begin{aligned}&(d_{xx})_2 x^2 \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{xx})_1 x \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{xz})_2 z^2 \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{xz})_1 z \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{zx})_2 x^2 \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{zx})_1 x \left(\frac{x}{R}\right) \\ &= \Delta R - (d_{zz})_2 z^2 \left(\frac{z}{R}\right) + (d_{zz})_1 z \left(\frac{z}{R}\right)\end{aligned}\quad (18)$$

โดยที่ $(d_{uv})_k$ แทนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการโพลิโนเมียล

ΔR_i เป็นความแตกต่างของระยะทางทั้งสองที่ตำแหน่งที่ i

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ $\delta_{xx}, \delta_{xz}, \delta_{zx}$

องค์ประกอบความผิดพลาด	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณา	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 18
δ_{xx}	$(d_{xx})_1$	$x\left(\frac{x}{R}\right)$
	$(d_{xx})_2$	$x^2\left(\frac{x}{R}\right)$
δ_{xz}	$(d_{xz})_1$	$z\left(\frac{x}{R}\right)$
	$(d_{xz})_2$	$z^2\left(\frac{x}{R}\right)$
δ_{zx}	$(d_{zx})_1$	$x\left(\frac{x}{R}\right)$
	$(d_{zx})_2$	$x^2\left(\frac{x}{R}\right)$

จากตารางที่ 4 จะแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาและค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 18 ซึ่งมีสมการที่ไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 6 สมการ ดังนั้นหากต้องการแก้สมการดังกล่าว จะต้องมีความแตกต่างของตำแหน่งของรูเจาะเท่ากับหรือมากกว่า 6 ตำแหน่ง เพื่อทำการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว โดยที่ความแตกต่างของตำแหน่งสามารถสร้างได้จากการเจาะรูที่ขึ้นงานมาตรฐาน

4.3 วิธีการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ δ_{xy}, δ_{yx}

ในการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ δ_{xy}, δ_{yx} สามารถพิจารณาได้จากการทดลองโดยการเจาะในระนาบ XY โดยที่จะไม่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดในแนวแกน Z ซึ่งในการหาองค์ประกอบความผิดพลาดของ δ_{xy}, δ_{yx} จะทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดทางปริมาตรเฉพาะ ΔV_x และ ΔV_y ซึ่งจะมีผลต่อความแตกต่างของความยาวทั้งสอง (ΔR) คือ

$$\Delta R = \Delta V_x \left(\frac{x}{R}\right) + \Delta V_y \left(\frac{y}{R}\right) \quad (19)$$

ปริมาตรความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแกน X และ Y นั้นจะเกิดจากการรวมกันขององค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) และจะทำการกำจัดองค์ประกอบความผิดพลาดที่ไม่เกี่ยวข้องออกซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\Delta V_x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} \\ \Delta V_y &= \delta_{yx} + \delta_{yy}\end{aligned}\quad (20)$$

องค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆจะถูกแสดงด้วยสมการโพลิโนเมียล (Polynomial) ซึ่งในการทดลอง เราจะทำการใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองในการพิจารณา ดังนั้นแต่ละองค์ประกอบความผิดพลาดสามารถแสดงได้คือ

$$\begin{aligned}\delta_{xx} &= (d_{xx})_2 x^2 + (d_{xx})_1 x \\ \delta_{xy} &= (d_{xy})_2 y^2 + (d_{xy})_1 y \\ \delta_{yx} &= (d_{yx})_2 x^2 + (d_{yx})_1 x \\ \delta_{yy} &= (d_{yy})_2 y^2 + (d_{yy})_1 y\end{aligned}\quad (21)$$

นำสมการที่ 21 แทนลงในสมการที่ 20 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta V_x &= (d_{xx})_2 x^2 + (d_{xx})_1 x + (d_{xy})_2 y^2 + (d_{xy})_1 y \\ \Delta V_y &= (d_{yx})_2 x^2 + (d_{yx})_1 x + (d_{yy})_2 y^2 + (d_{yy})_1 y\end{aligned}\quad (22)$$

นำสมการที่ 22 ไปใช้ในสมการที่ 19 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}&(d_{xy})_2 y^2 \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{xy})_1 y \left(\frac{x}{R}\right) + (d_{yx})_2 x^2 \left(\frac{y}{R}\right) + (d_{yx})_1 x \left(\frac{y}{R}\right) \\ &= \Delta R - (d_{xx})_2 x^2 \left(\frac{x}{R}\right) - (d_{xx})_1 x \left(\frac{x}{R}\right) - (d_{yy})_2 y^2 \left(\frac{y}{R}\right) + (d_{yy})_1 y \left(\frac{y}{R}\right)\end{aligned}\quad (23)$$

โดยที่ $(d_{uv})_k$ แทนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการโพลิโนเมียล
 ΔR_i เป็นความแตกต่างของระยะทางทั้งสองที่ตำแหน่งที่ i

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาองค์ประกอบความผิดพลาดของ δ_{xy}, δ_{yx}

องค์ประกอบความผิดพลาด	พารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณา	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 23
δ_{xy}	$(d_{xy})_1$	$y(\frac{x}{R})$
	$(d_{xy})_2$	$y^2(\frac{x}{R})$
δ_{yx}	$(d_{yx})_1$	$x(\frac{y}{R})$
	$(d_{yx})_2$	$x^2(\frac{y}{R})$

จากตารางที่ 5 จะแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการพิจารณาและค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 23 ซึ่งมีสมการที่ไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 4 ดังนั้นหากต้องการแก้สมการดังกล่าวจะต้องมีความแตกต่างของตำแหน่งรูเจาะเท่ากับหรือมากกว่า 4 ตำแหน่ง เพื่อทำการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว โดยที่ความแตกต่างของตำแหน่งสามารถสร้างได้จากการเจาะรูที่ขึ้นงานมาตรฐาน

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 13, 18, 23 และความแตกต่างของความยาวทั้งสอง (ΔR) แล้ว ก็จะมาทำการคำนวณเพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการโพลีโนเมียล ซึ่ง Guiquan Chen (Chen, 2000) และ Ji-Hun Jung (Jung., *et al.*, 2006) ได้ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ในการคำนวณเพื่อหาค่าดังกล่าว หลังจากคำนวณแล้วก็จะได้อัตราองค์ประกอบความผิดพลาดซึ่งอยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียล

5. ตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าความผิดพลาดด้วยวิธีจลนศาสตร์ย้อนกลับ โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

งานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบการวัดทางแสงเข้ามาใช้ในการทำการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการหาค่าประกอบความผิดพลาดด้วยวิธีจลนศาสตร์ย้อนกลับ ซึ่งเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ที่ใช้ในการวัด คือ RENISHAW ML10 (ดังภาพที่ 25) ของฝ่ายเครื่องมือวัด สถาบันคั้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งสำหรับในการวัดเพื่อหาความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่นั้นจะทำการติดตั้งกระจกสำหรับแทรกสอดที่สปินเดิล ส่วนกระจกสำหรับสะท้อนจะติดตั้งที่แท่นเครื่อง ดังภาพที่ 43 และภาพที่ 44



ภาพที่ 43 การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์เพื่อวัดองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน



ภาพที่ 44 ขั้นตอนการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

หลังจากนั้นก็ทำการปรับตั้งให้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์, กระจกสำหรับแทรกสอดและ กระจกสำหรับสะท้อนอยู่ในแนวเดียวกัน แล้วสั่งให้เครื่องจักรเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดก็ จะทำการหยุดเพื่อทำการบันทึกค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งนั้นๆ หลังจากนั้นก็ทำการสั่งให้ เครื่องจักรเคลื่อนที่เพื่อไปวัดที่ตำแหน่งต่อไป ซึ่งจะทำเช่นนี้จนครอบคลุมช่วงของเครื่องจักรที่ ต้องการวัด ซึ่งระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนนั้นมีดังนี้

ระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน X คือ 0 ถึง 1000 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะการหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Y คือ 0 ถึง -480 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะการหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Z คือ 0 ถึง -480 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ส่วนในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่จะทำการติดตั้งกระจกสำหรับแทรกสอดที่สปินเดิล ส่วนกระจกสำหรับสะท้อนจะติดตั้งที่แท่นเครื่อง แล้วทำการปรับตั้งให้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และกระจกสำหรับสะท้อนอยู่ในแนวเดียวกัน แต่ในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแนวแกน X นั้น กระจกสำหรับสะท้อนจะวางในแนวที่ตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ แล้วตั้งให้เครื่องจักรเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดและทำการหยุดเพื่อทำการบันทึกค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งนั้นๆ หลังจากนั้นก็ทำการตั้งให้เครื่องจักรเคลื่อนที่เพื่อไปวัดที่ตำแหน่งต่อไป ซึ่งจะทำเช่นนี้จนครบกลุ่มช่วงของเครื่องจักรที่ต้องการวัด ซึ่งช่วงการความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนนี้มีดังนี้

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแกน X คือ 0 ถึง 600 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแกน X คือ 0 ถึง 600 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแกน Y คือ 0 ถึง -400 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแกน Y คือ 0 ถึง -400 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแกน Z คือ 0 ถึง -460 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในแนวแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแกน Z คือ 0 ถึง -460 มิลลิเมตร โดยมีช่วงระยะเวลาหยุดบันทึกค่า คือ 20 มิลลิเมตร

5.1 การกำหนดจำนวนรอบทำซ้ำในการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ในการหาจำนวนรอบทำซ้ำในการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ เพื่อให้อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการกำหนดจำนวนรอบที่จะทำการวัดเริ่มต้น R_0 รอบ แล้วทำการหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ทำการวัดข้างต้น (S) รวมทั้งกำหนดค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ เพื่อที่จะหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสม ดังสมการที่ 24

$$n' = \left(\frac{t_{\alpha/2, n-1} \cdot S}{\varepsilon} \right)^2 \quad (24)$$

โดยที่ n' หมายถึง จำนวนรอบการทดลอง
 ε หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
 α หมายถึง ระดับนัยสำคัญ
 s หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในการหาจำนวนรอบทำซ้ำในการวัดเพื่อหาความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน $Z (\delta_{zz})$ ด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ โดยจะทำการใช้สมการที่ 24 เพื่อใช้ในการหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสม โดยที่กำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 10% ของค่าเฉลี่ยและทำการวัดเริ่มต้นที่ 4 รอบ

$$n' = \frac{(t_{\alpha/2, 3} 0.000294)}{2}$$

$$n' = \frac{(3.182 \times 0.000294)}{2} = 1.88$$

$$n' = 2$$

เพราะฉะนั้นจำนวนรอบทำซ้ำเริ่มต้น 4 รอบ มีค่ามากกว่ารอบจำนวนทำซ้ำที่เหมาะสม ดังนั้นจำนวนรอบทำซ้ำ 4 รอบจึงพอเพียงต่อความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัด

6. การหาความแม่นยำในการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับ

ในการวัดความแม่นยำในการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับจะเป็นการพิจารณาความแตกต่างของค่าความผิดพลาดของค่าทั้งสอง ซึ่งในการวัดความแม่นยำนั้นจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean Square Error) หรือ MSE และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error) หรือ MAPE ในการพิจารณานั้นจะทำการวัดความแปรปรวนระหว่างค่าซึ่งได้จากการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับและค่าการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ซึ่งหากผิดพลาดดังกล่าวมีมาก ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองจะสูงขึ้นเพราะเป็นค่าที่ยกกำลังสอง หากค่าดังกล่าวไม่มีความลำเอียง ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองจะใช้เป็นค่าที่ประเมินค่าแปรปรวนของค่าผิดพลาด โดยปกติค่าถอดรากกำลังสองค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองจะได้รากที่สองของค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง (Root Mean Square Error) หรือ RMSE ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวประเมินค่าเบี่ยงเบนของความผิดพลาด ส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์นั้นจะเป็นการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับและค่าการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$MSE = \frac{\sum (\delta_{ij} - \hat{\delta}_{ij})^2}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\delta_{ij} - \hat{\delta}_{ij})^2}{n}}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta_{ij} - \hat{\delta}_{ij}}{\delta_{ij}} \right|$$

โดยที่ δ_{ij} คือ องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับ

$\hat{\delta}_{ij}$ คือ องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

n คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการวัด

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการทดลองในการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับ

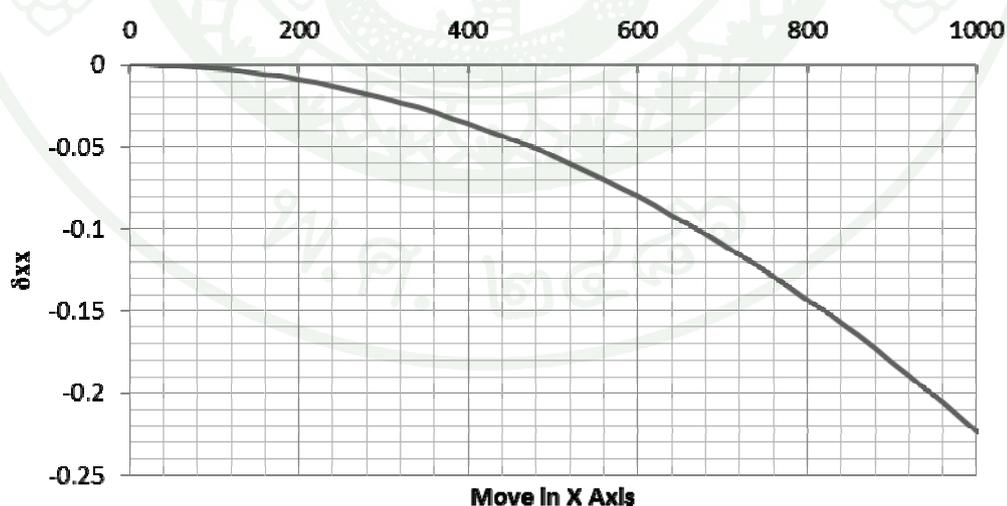
เมื่อทำการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) แล้วจะทำให้ทราบองค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งจะถูกแสดงในรูปของสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

1.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่

1.1.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

$$\delta_{xx} = -2.23 \times 10^{-7} x^2 + 2.77 \times 10^{-9} x$$

จากสมการสามารถสร้างแผนภูมิการกระจายซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 45

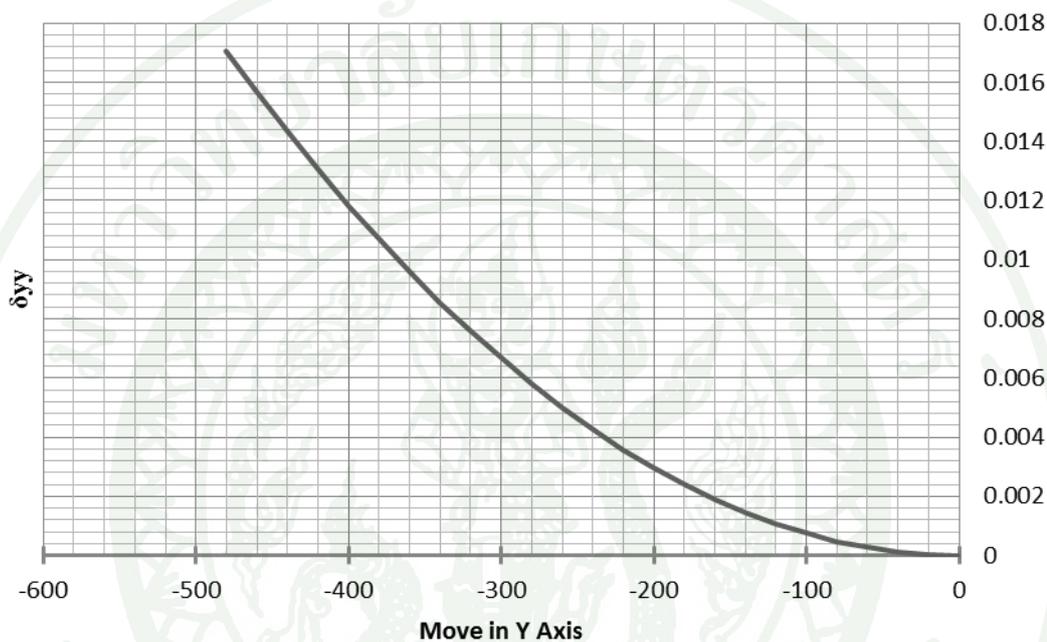


ภาพที่ 45 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับ

1.1.2 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

$$\delta_{yy} = 7.4 \times 10^{-8} y^2 + 8.02 \times 10^{-10} y$$

จากสมการสามารถสร้างแผนภูมิการกระจายซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 46

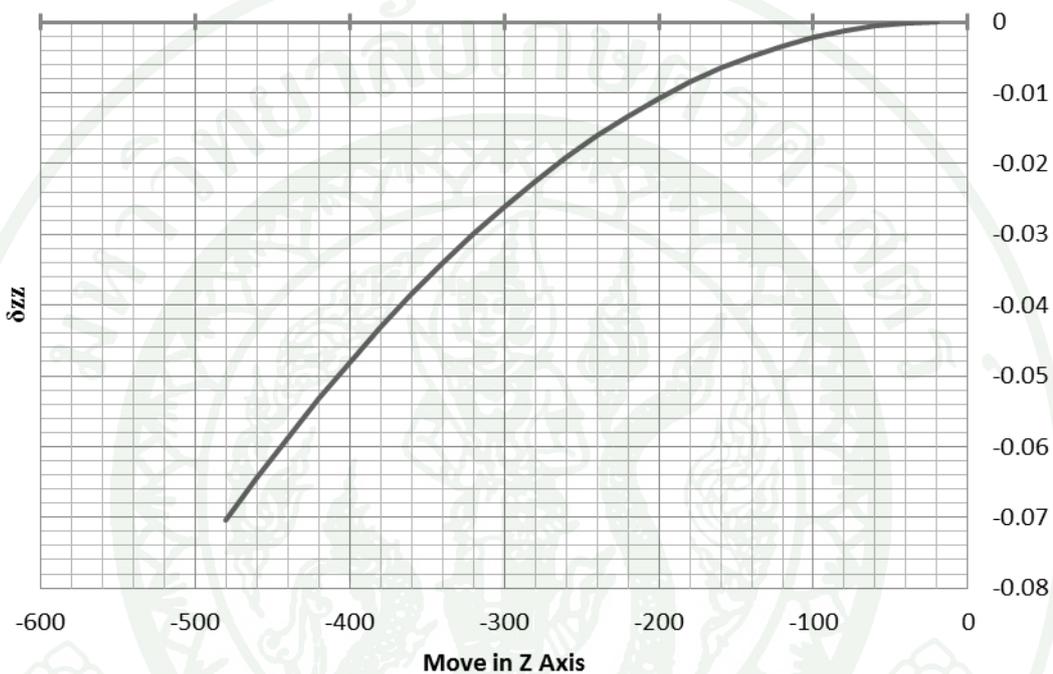


ภาพที่ 46 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
โดยการวิเคราะห์জনসন্ত্র্ষণন

1.1.3 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

$$\delta_{zz} = -3.33 \times 10^{-7} z^2 + 7.20 \times 10^{-10} z$$

จากสมการสามารถสร้างแผนภูมิการกระจายซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 47



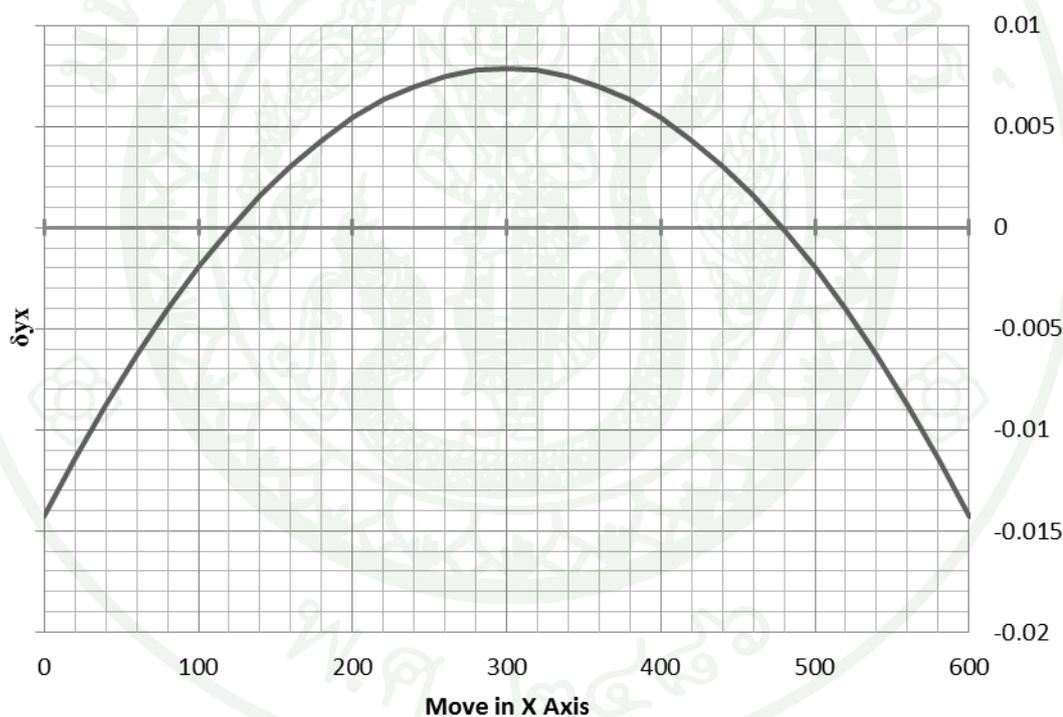
ภาพที่ 47 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z
โดยการวิเคราะห์จำลองศาสตร์ย้อนกลับ

1.2 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่

1.2.1 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

$$\delta_{yx} = -2.47 \times 10^{-7} x^2 + 1.07 \times 10^{-4} x$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ $\delta_{yx} = -4.09 \times 10^{-5} x + 0.0143$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 48



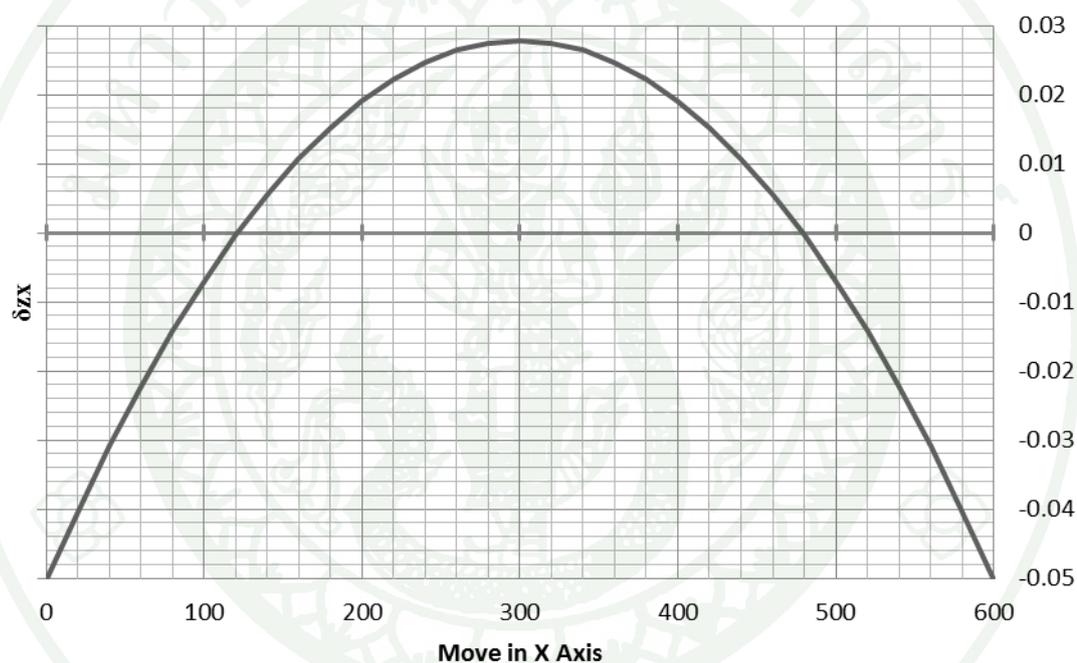
ภาพที่ 48 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

1.2.2 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

$$\delta_{zx} = -8.69 \times 10^{-7} x^2 + 2.19 \times 10^{-9} x$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ

$\delta_{zx} = -5.21 \times 10^{-4} x + 0.0504$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 49



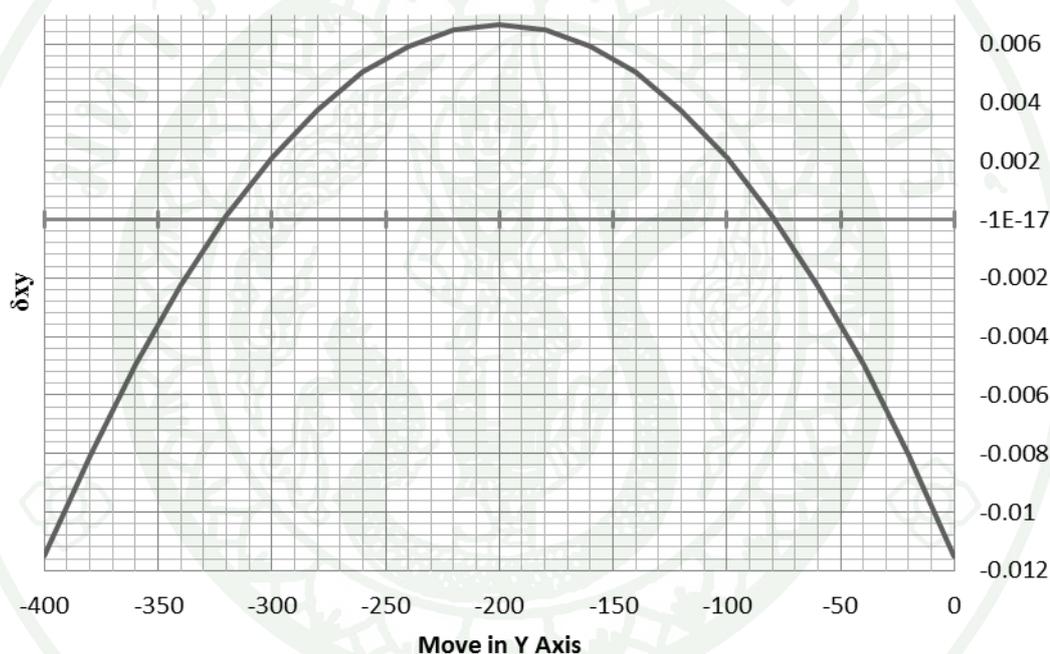
ภาพที่ 49 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

1.2.3 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

$$\delta_{xy} = -4.54 \times 10^{-7} y^2 + 1.04 \times 10^{-9} y$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ

$\delta_{xy} = 1.82 \times 10^{-4} x + 0.0115$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 50

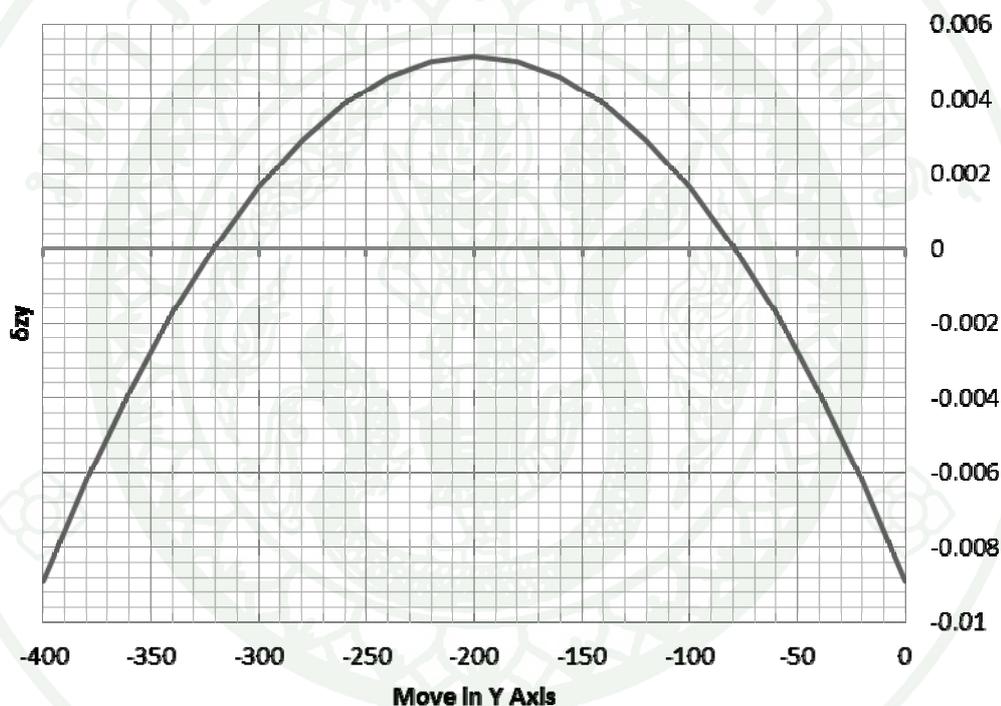


ภาพที่ 50 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

1.2.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

$$\delta_{zy} = -3.52 \times 10^{-7} y^2 - 7.43 \times 10^{-10} y$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ $\delta_{xy} = 1.41 \times 10^{-4} x + 0.0089$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 51



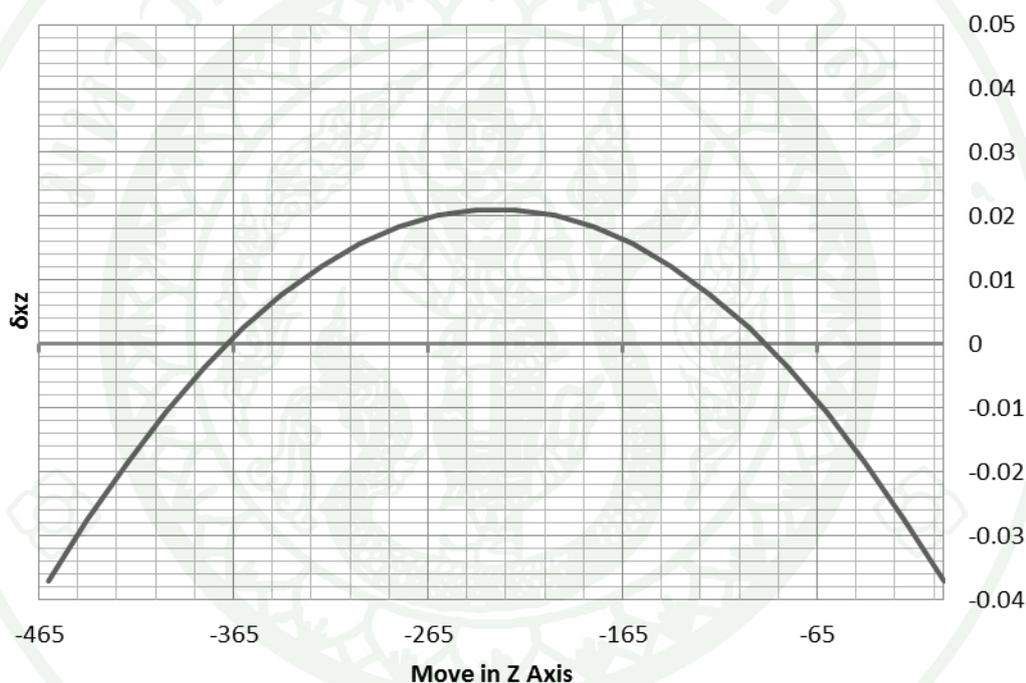
ภาพที่ 51 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

1.2.5 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

$$\delta_{xz} = -1.10 \times 10^{-6} z^2 + 2.19 \times 10^{-9} z$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ

$\delta_{xy} = 5.07 \times 10^{-4} x + 0.0372$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 52



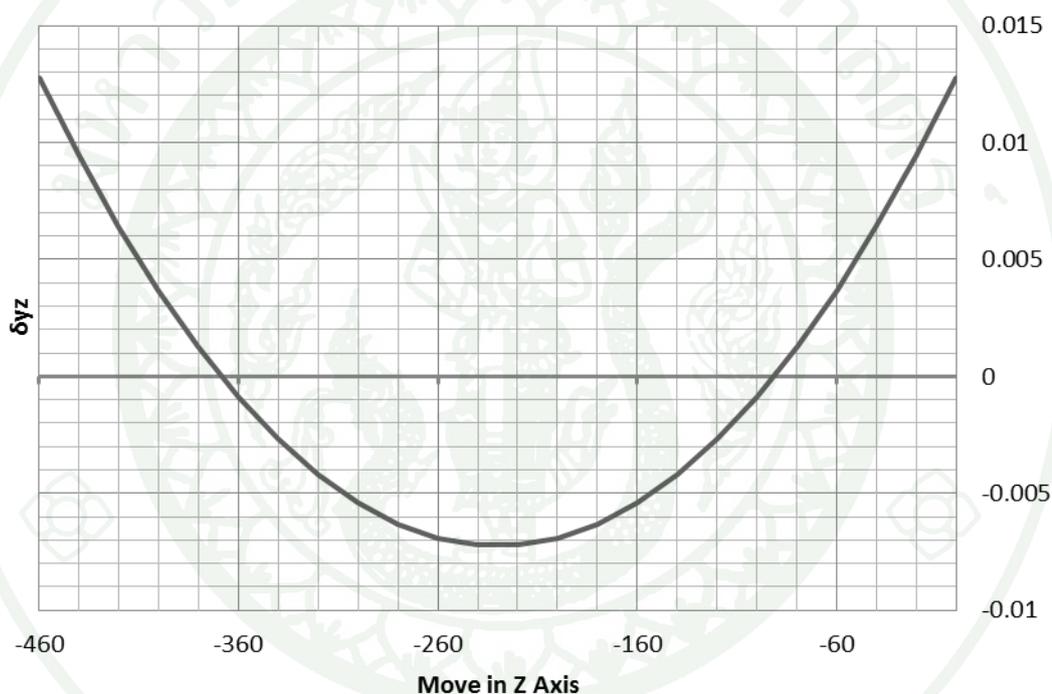
ภาพที่ 52 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃত্য้อนกลับ

1.2.6 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

$$\delta_{yz} = 3.78 \times 10^{-7} z^2 - 7.43 \times 10^{-10} z$$

จากสมการจะนำมาสร้างแผนภูมิการกระจายเพื่อหาค่าผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่เทียบกับเส้นที่พอดีกับจุดต่างๆ โดยที่มีสมการของเส้นอุดมคติคือ

$\delta_{yz} = -1.74 \times 10^{-4} x - 0.0128$ ดังนั้นความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 53



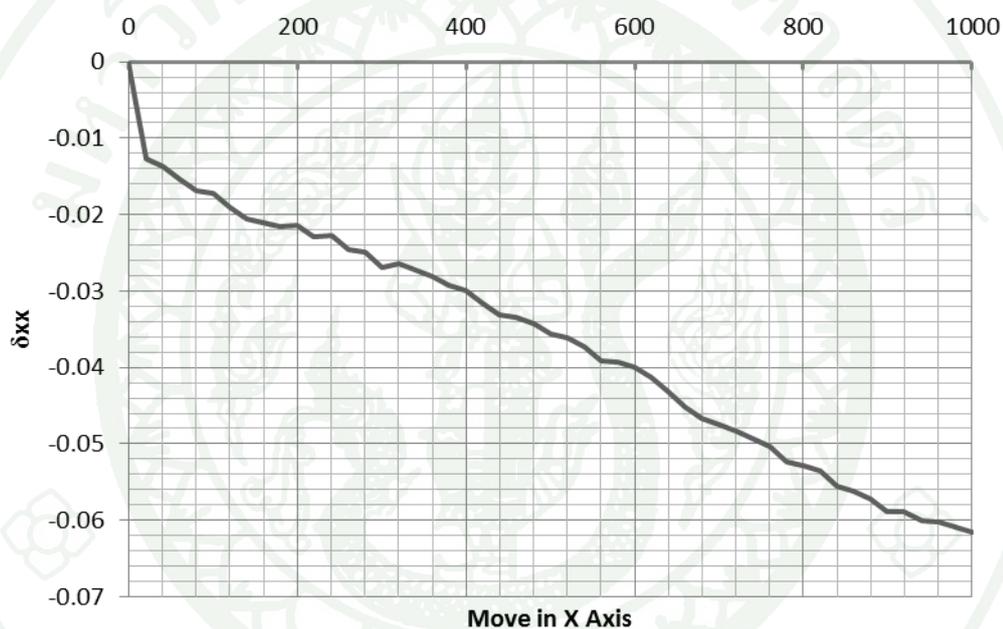
ภาพที่ 53 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์জনস্বাস্ত্রীয়อนกลับ

2. ผลการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.1 การวัดความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.1.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

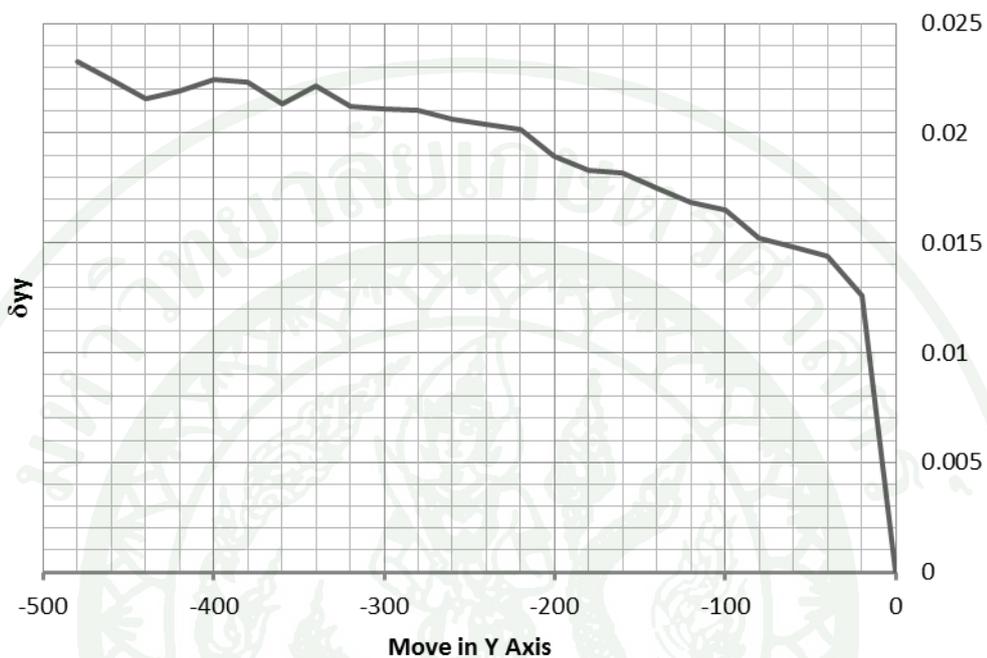
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.1.2 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

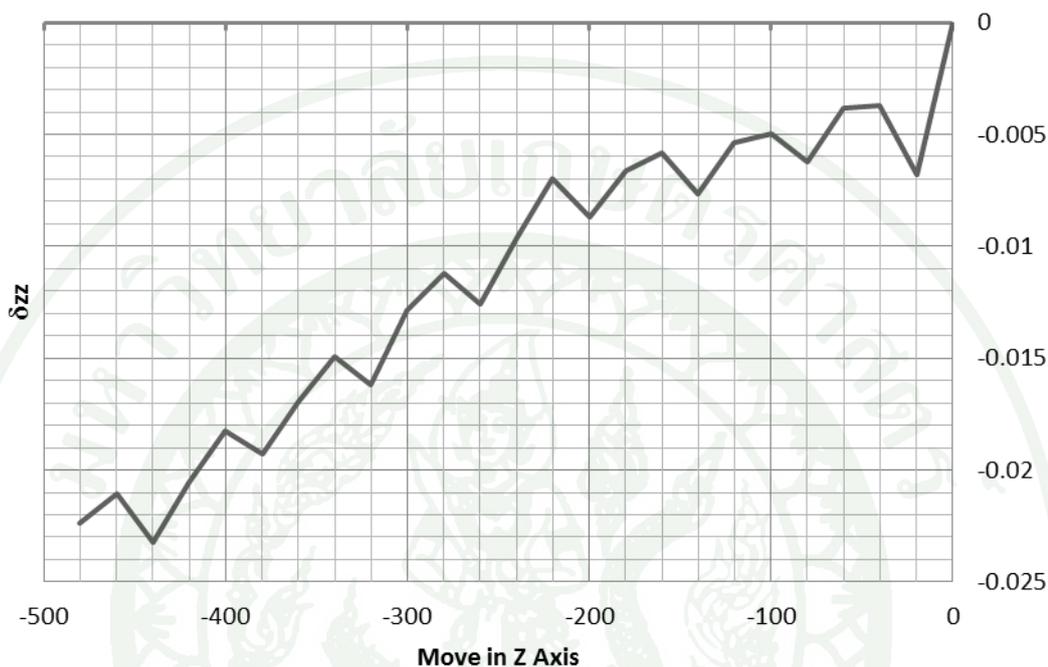
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.1.3 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 56

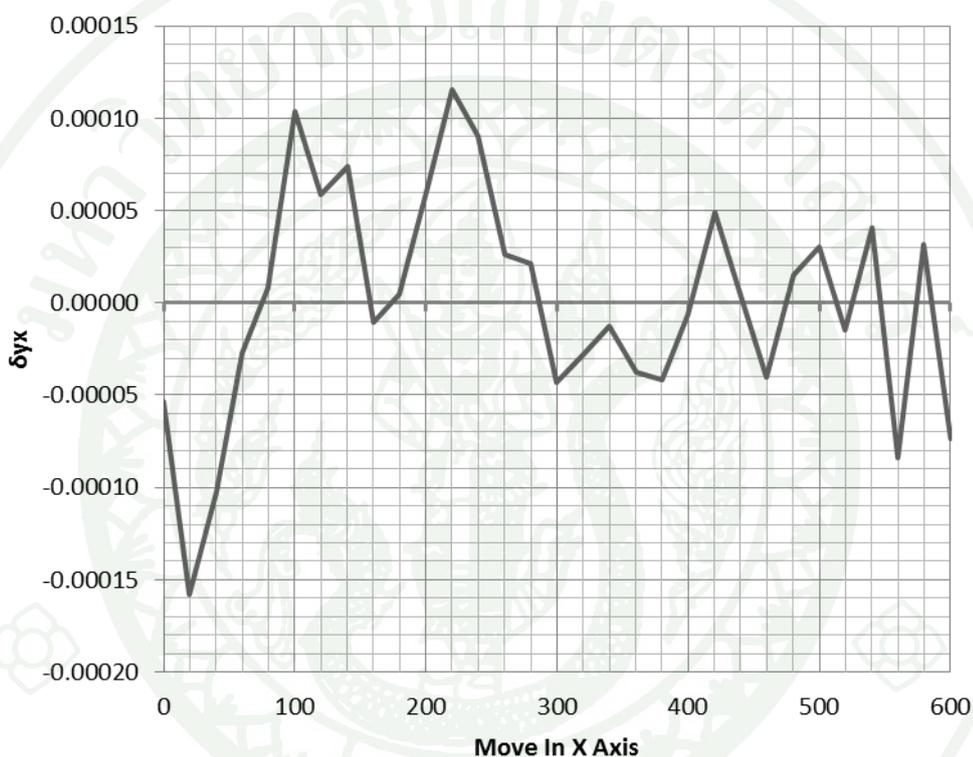


ภาพที่ 56 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2 การวัดความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.1 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

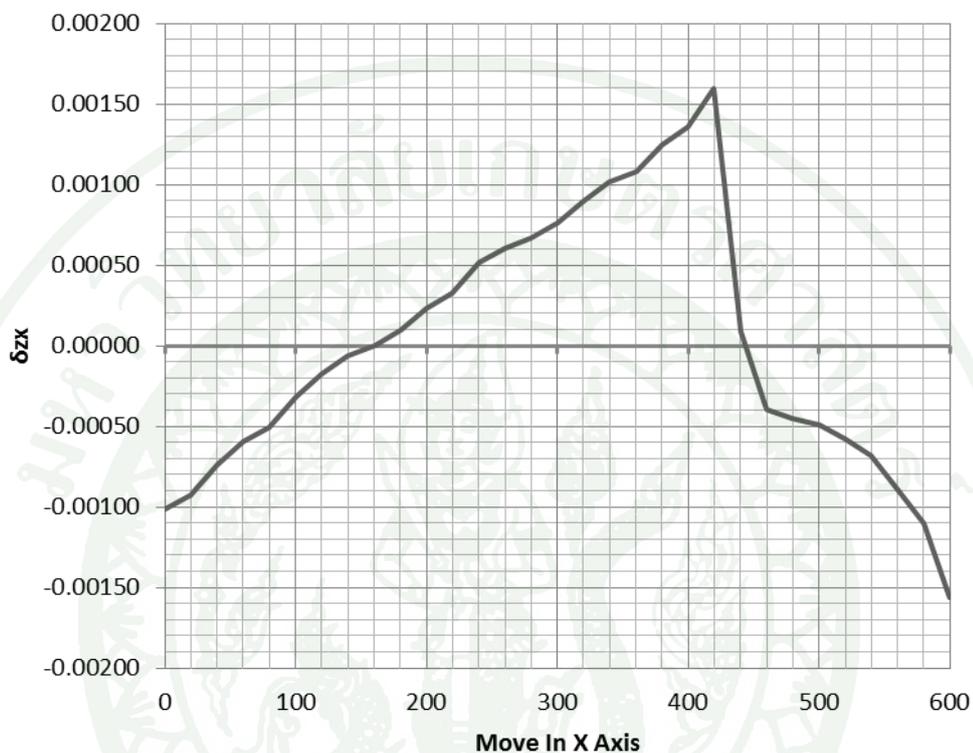
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.2 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

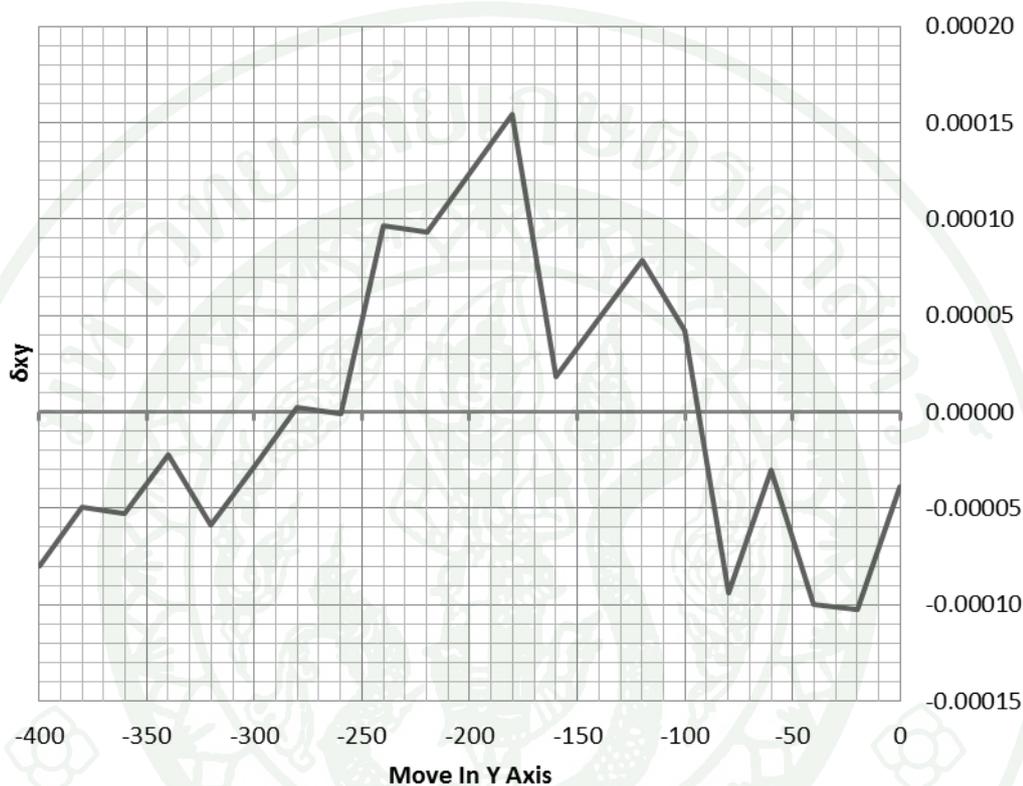
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.3 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

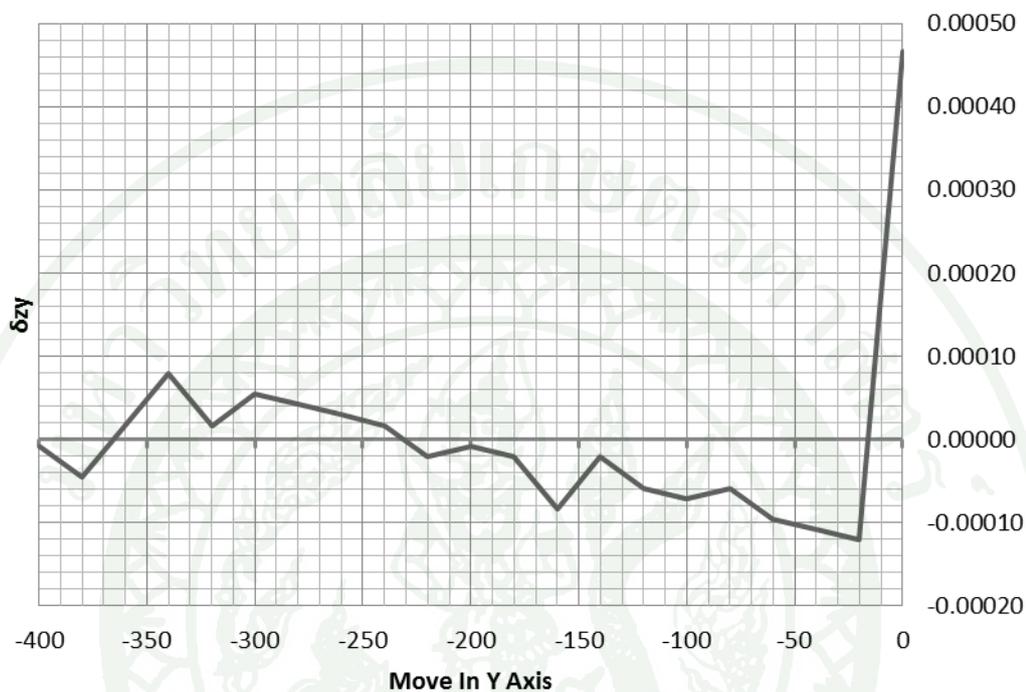
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 59



ภาพที่ 59 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

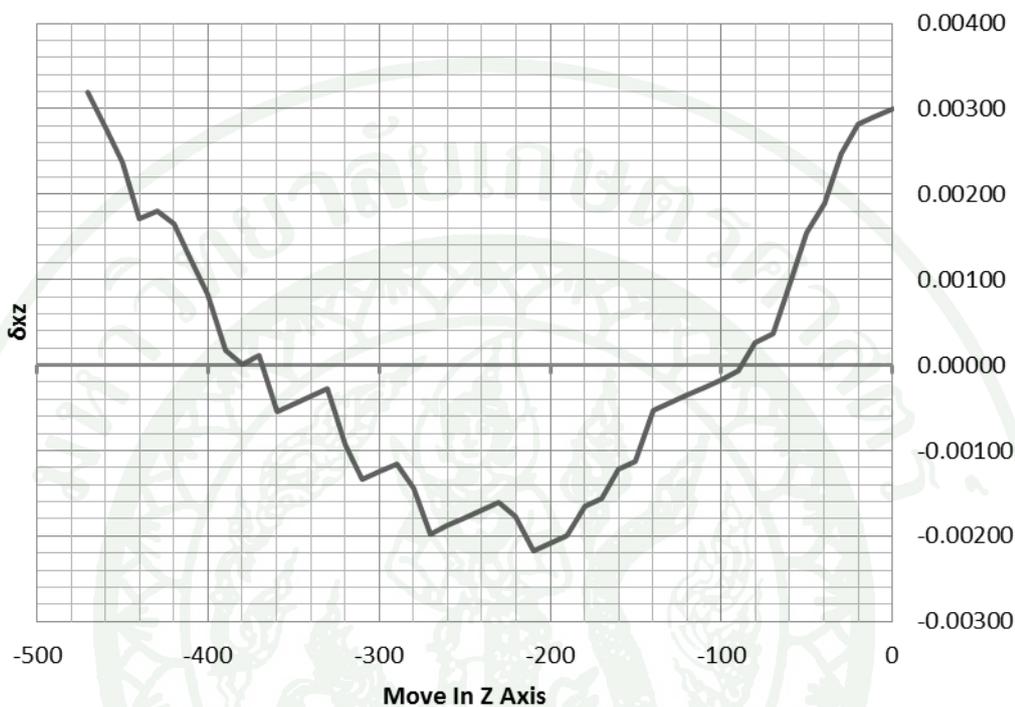
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.5 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

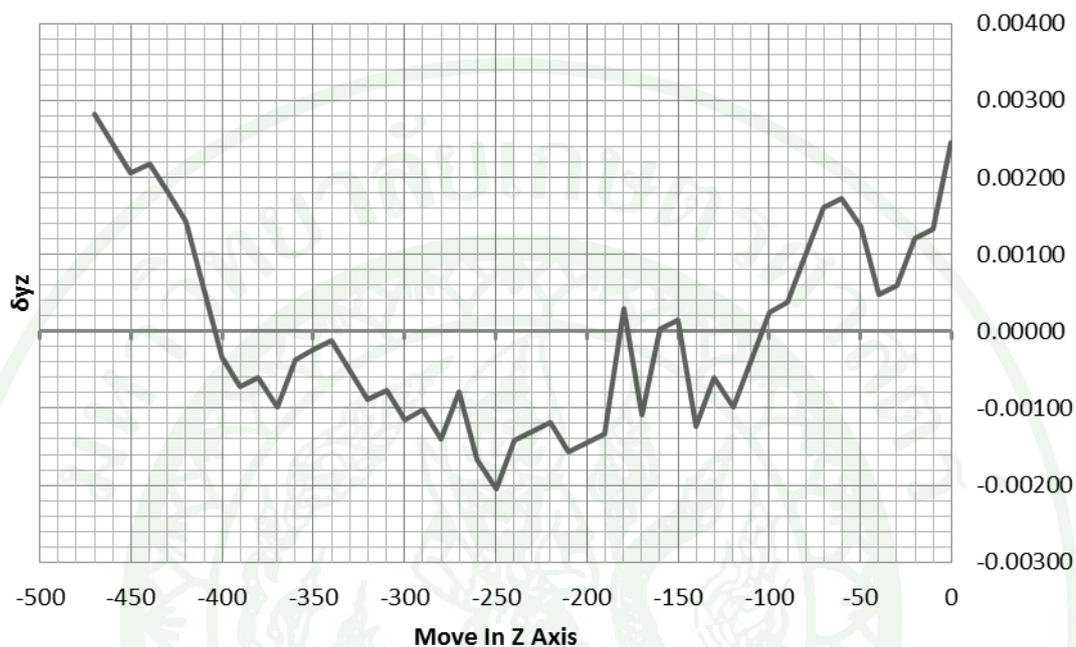
สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 61



ภาพที่ 61 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.2.6 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 62

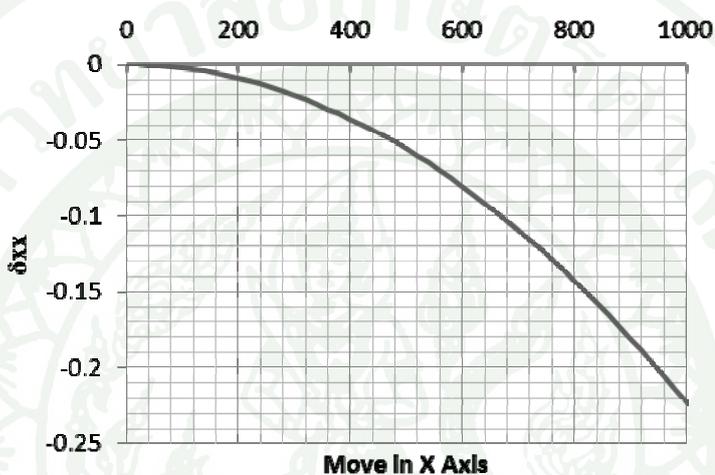


ภาพที่ 62 แผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

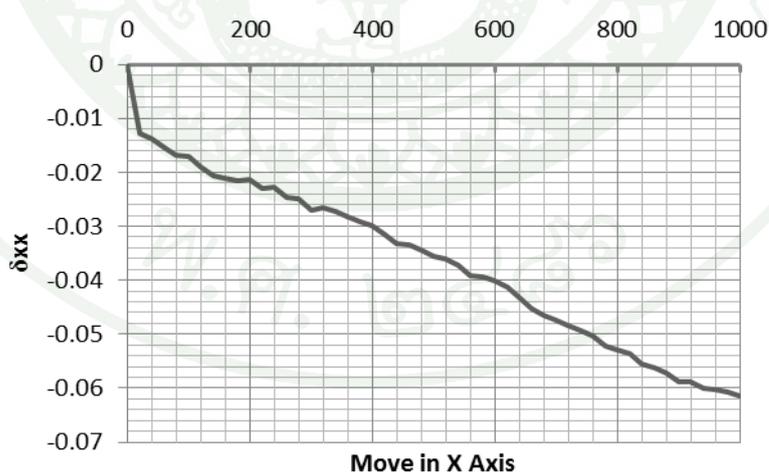
2.3 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการหาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับและการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

2.3.1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 63



ก. การวิเคราะห์หัจจนศาสตร์ย้อนกลับ

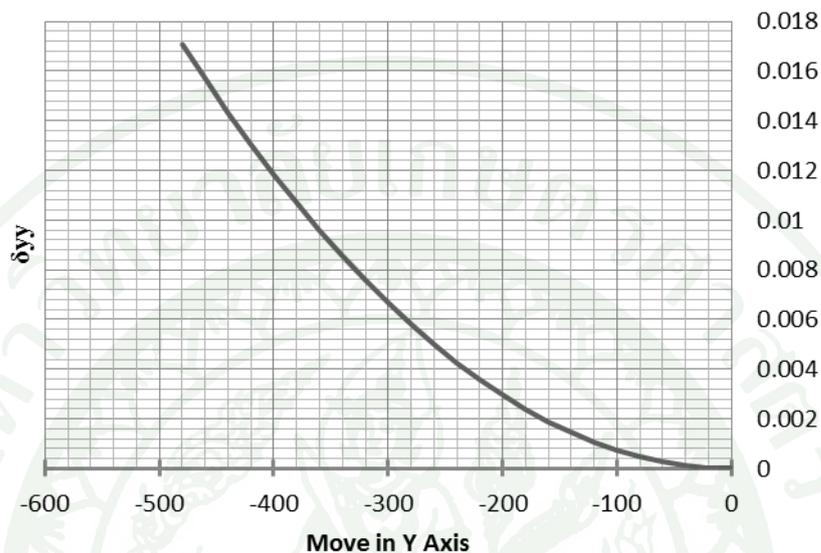


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

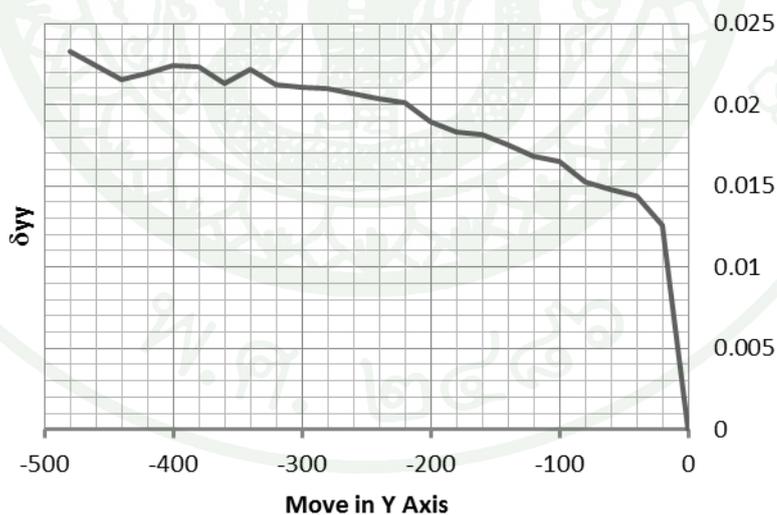
ภาพที่ 63 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

2.3.2 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 64



ก. การวิเคราะห์หัจลนศาสตร์ย้อนกลับ

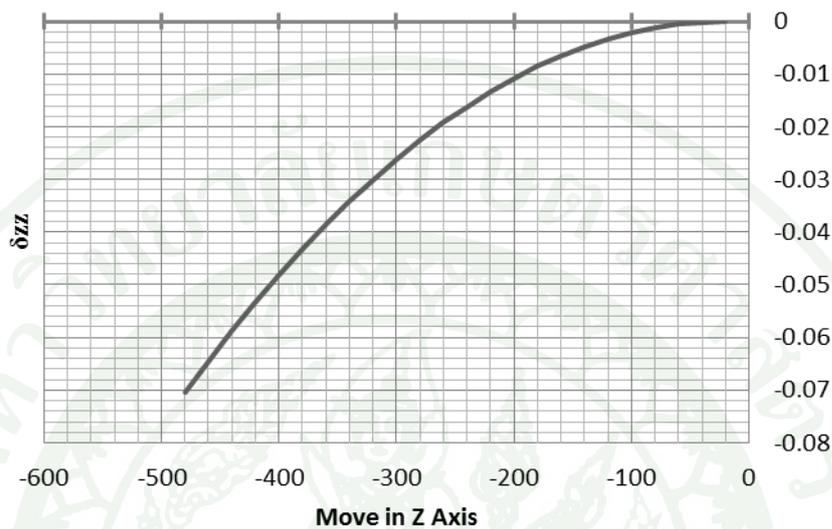


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

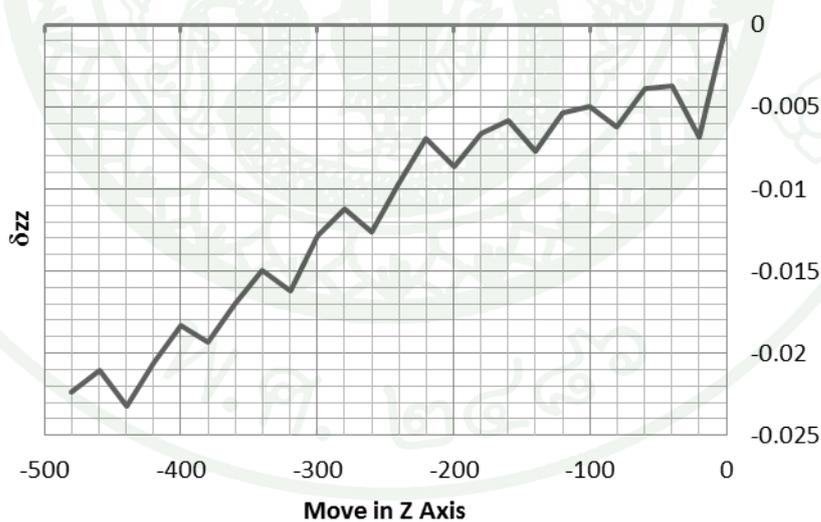
ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่
ในแนวแกน Y

2.3.3 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 65



ก. การวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

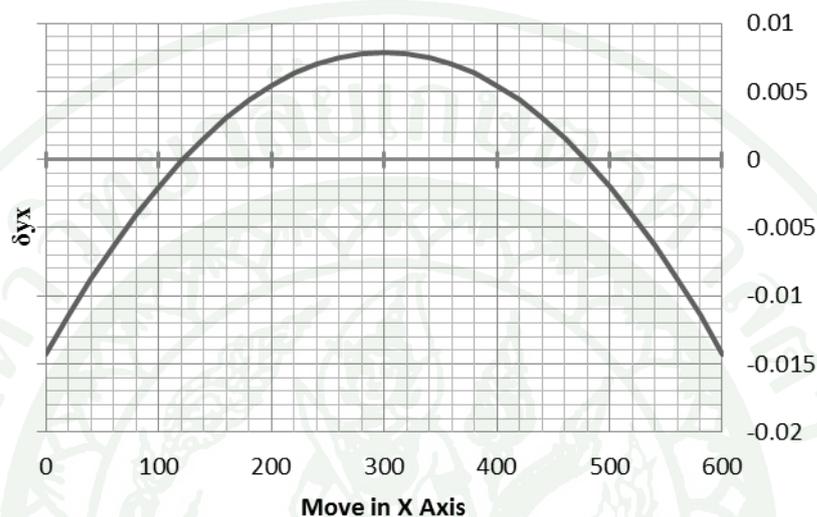


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

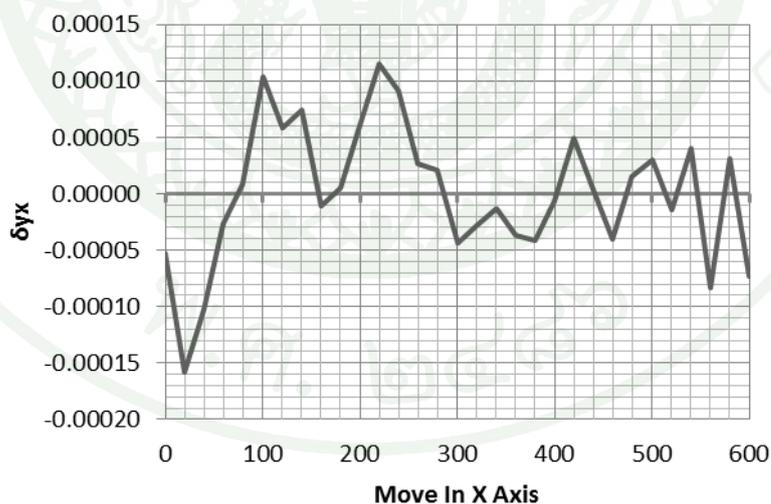
ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

2.3.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 66



ก. การวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

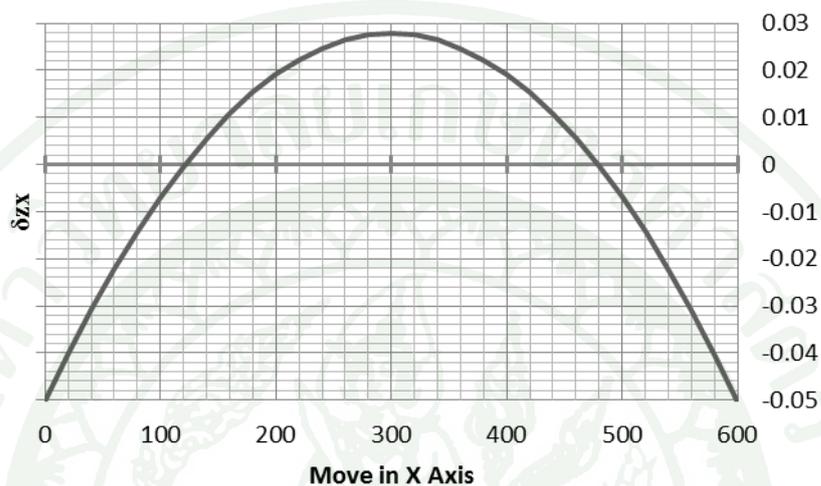


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

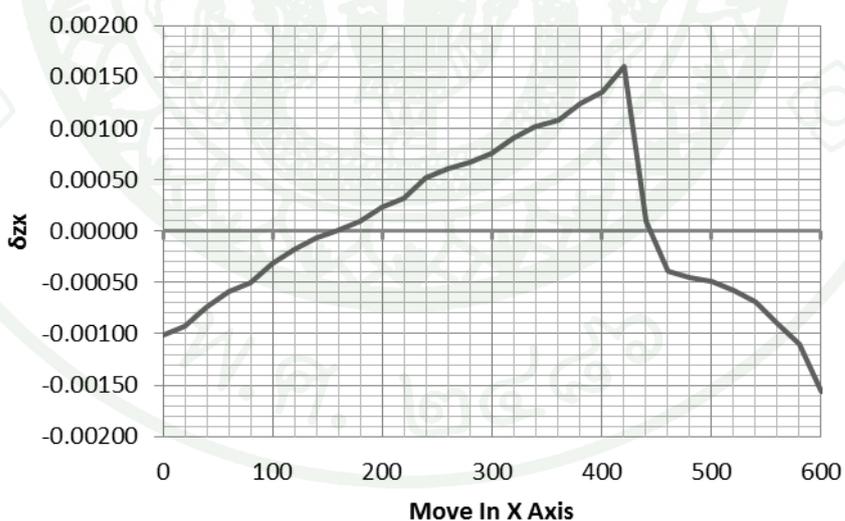
ภาพที่ 66 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

2.3.5 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 67



ก. การวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

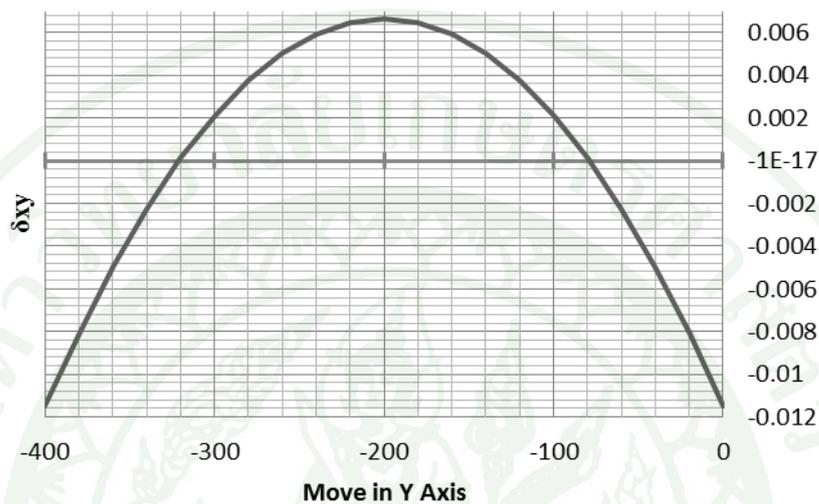


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

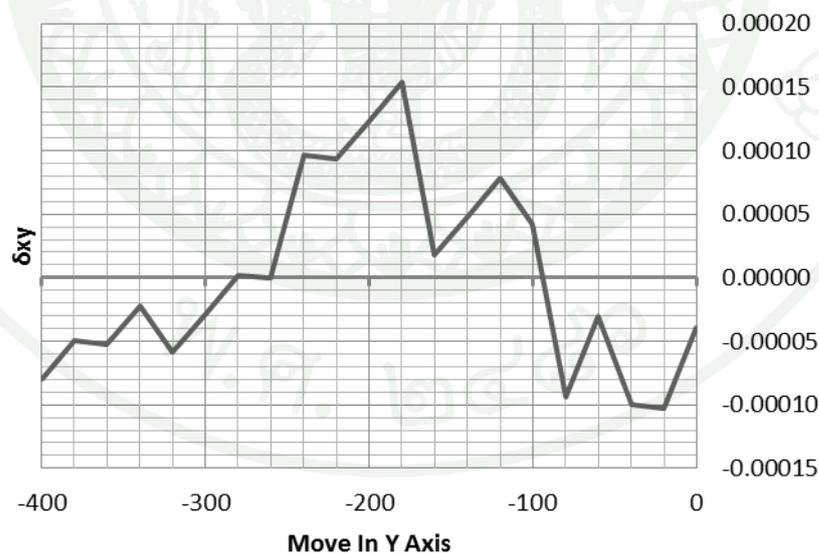
ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

2.3.6 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 68



ก. การวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

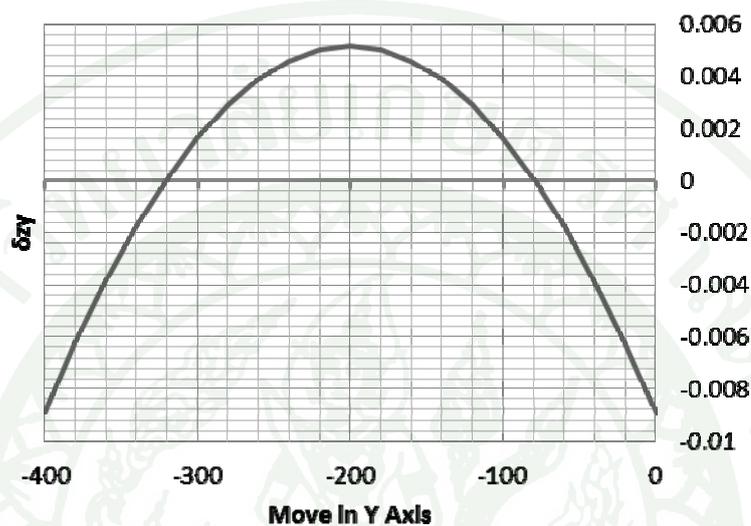


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

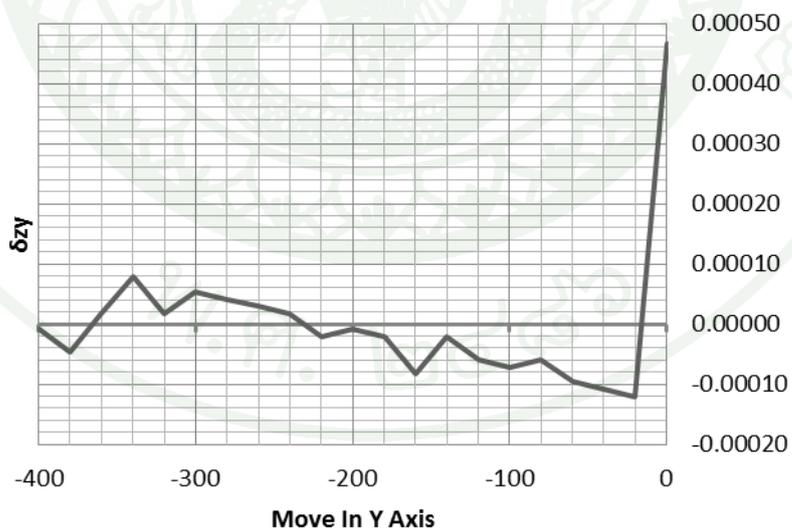
ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

2.3.7 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 69



ก. การวิเคราะห์จำลองศาสตร์ย้อนกลับ

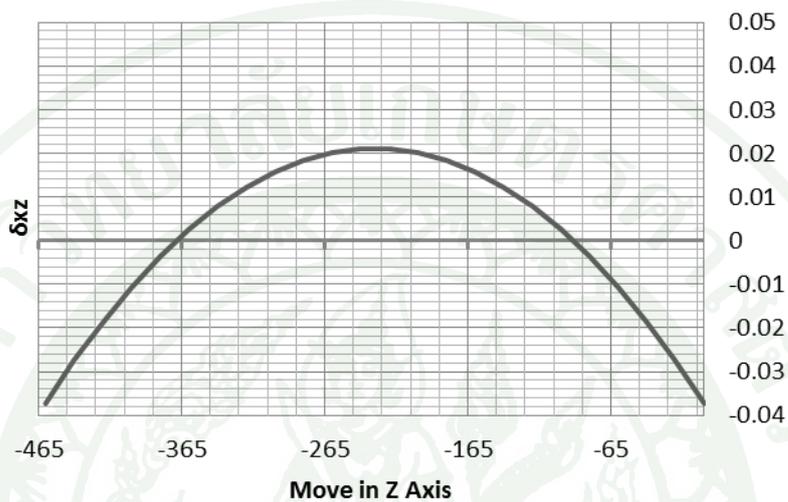


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

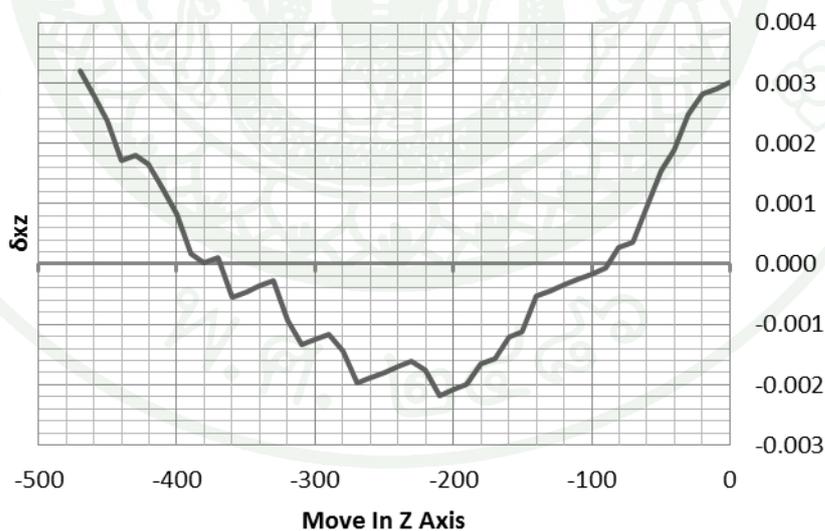
ภาพที่ 69 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

2.3.8 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 70



ก. การวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ

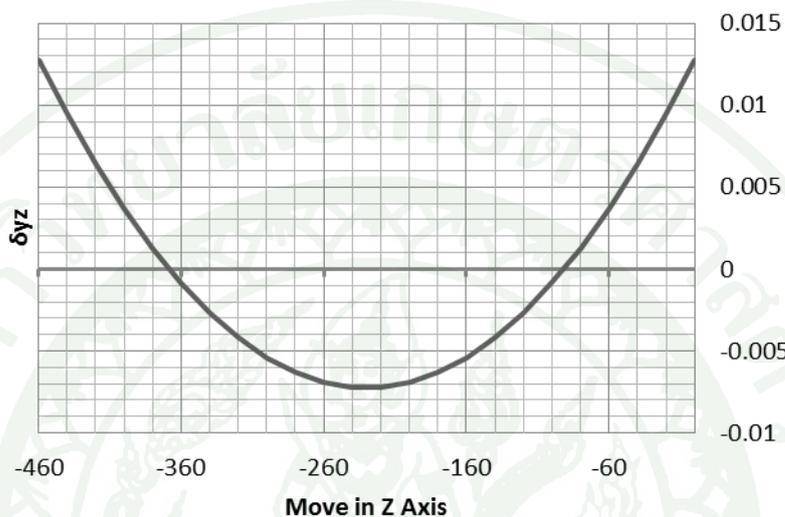


ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

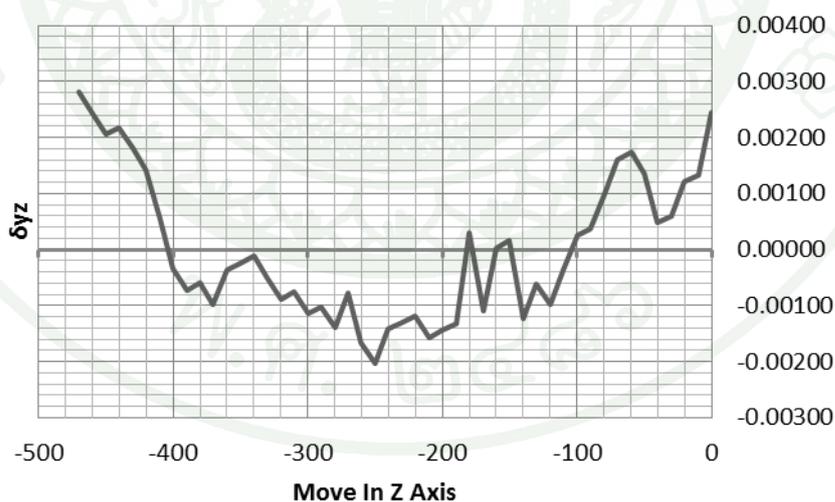
ภาพที่ 70 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

2.3.9 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ซึ่งสามารถแสดงด้วยแผนภูมิการกระจายได้ดังภาพที่ 71



ก. การวิเคราะห์หัจฉนศาสตร์ย้อนกลับ



ข. การวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ภาพที่ 71 การเปรียบเทียบแผนภูมิการกระจายตัวของความผิดพลาดเนื่องจากความตรง
ในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

3. การหาความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসাত্ৰীยอนกลับ

ในการหาความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসাত্ৰীยอนกลับนั้นจะใช้ผลการวัดค่าองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์มาเป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งตัวชี้วัดความแม่นยำนั้นทางผู้วิจัยได้ใช้การหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง รากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสอง และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ โดยจะทำการพิจารณาระยะตลอดช่วงความยาวของแกนและระยะของความยาวชิ้นงานมาตรฐาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6 และ 7

3.1 ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসাত্ৰীยอนกลับ ตลอดช่วงความยาวของแกน

ตารางที่ 6 ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসাত্ৰীยอนกลับ ตลอดช่วงความยาวของแกน

องค์ประกอบความผิดพลาด	ค่าเฉลี่ย ความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (MSE)	รากที่สอง ของความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (RMSE)	ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ของความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน X	0.0043	0.0657	102.31
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Y	0.0002	0.0134	68.98
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Z	0.0005	0.0229	108.24
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	0.000049	0.0070	24291.81
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	0.000582	0.0241	4147.77
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	0.000035	0.0059	12208.50
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	0.000021	0.0046	51158.56

ตารางที่ 6 (ต่อ)

องค์ประกอบความผิดพลาด	ค่าเฉลี่ย ความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (MSE)	รากที่สอง ของความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (RMSE)	ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ของความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	0.00042	0.02039	2345.96
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	0.000029	0.005360	1219.52

3.2 ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ
ของช่วงความยาวชิ้นงานมาตรฐาน

ตารางที่ 7 ความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับของ
ช่วงความยาวชิ้นงานมาตรฐาน

องค์ประกอบความผิดพลาด	ค่าเฉลี่ย ความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (MSE)	รากที่สอง ของความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (RMSE)	ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ของความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน X	0.00014	0.01188	49.01
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Y	0.00018	0.01343	68.98
ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแกน Z	0.00187	0.04322	199.27
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	0.00004	0.00639	24751.88
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X	0.00048	0.02198	4364.28

ตารางที่ 7 (ต่อ)

องค์ประกอบความผิดพลาด	ค่าเฉลี่ย ความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (MSE)	รากที่สอง ของความ ผิดพลาดยก กำลังสอง (RMSE)	ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ ของความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	0.00002	0.00463	12208.50
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	0.00003	0.00588	51158.56
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	0.00095	0.03087	1456.52
ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	0.00006	0.00783	368.83

วิจารณ์

จากการพิจารณาผลการทดลองในการหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หจลนศาสตร์ย้อนกลับพบว่า การหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์หจลนศาสตร์ย้อนกลับของความผิดพลาดทางด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, และ Z ซึ่งเป็นความผิดพลาดหลักของเครื่องจักรให้ค่าความผิดพลาดที่สูงกว่าการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ แต่แนวโน้มของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ โดยที่ค่าความผิดพลาดดังกล่าวนั้น อาจะเกิดขึ้นมาจากแรงที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนชิ้นงาน (Cutting-force Induced Errors), ความไม่กลมของชุดหัวหมุนชิ้นงาน หรืออาจเกิดจากการที่อุปกรณ์ตัดเฉือนชิ้นงานมีการสึกหรอเมื่อถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน สาเหตุดังกล่าวอาจจะทำให้ตำแหน่งที่ทำการเจาะมีความผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดต่างๆ รวมทั้งยังเกิดจากองค์ประกอบความผิดพลาดเนื่องจากการบิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ (Hai, 1994) ถูกรวมเข้าไปในค่าความผิดพลาดทางด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ด้วย ส่วนค่าความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของการเคลื่อนที่ พบว่าความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีแนวโน้มของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ แต่ค่าของความผิดพลาดดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ส่วนความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z จะมีค่ามากกว่า และมีแนวโน้มของค่าความผิดพลาดจะไม่สอดคล้องกับการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ซึ่งสาเหตุดังกล่าวอาจจะเกิดเนื่องมาจากความไม่ตรงของรางนำทาง ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนต่างๆ (Squareness Error) และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ขึ้นมา ส่วน Pitch Error และ Yaw Error ซึ่งเป็นความผิดพลาดเนื่องจากการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ (Angular error) ในทิศทางตั้งฉากในแต่ละแกนจะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนด้วยเช่นกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดเนื่องจากการบิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่และความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกน อาจจะถูกรวมเข้าไปด้วยทำให้ค่าที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและ โครงสร้างและความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ (Geometric and Kinematic Errors) เพื่อหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับด้วยการตัดเงื่อนไขงานมาตรฐาน ซึ่งจะทำการเจาะรูชิ้นงานมีความลึกที่แตกต่างกัน แล้วนำชิ้นงานไปวัดเพื่อหาตำแหน่งโดยใช้เครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซึ่งความแตกต่างของตำแหน่งที่ทำการเจาะรูและวัดด้วยเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแกนการเคลื่อนที่ ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องนั้นจะใช้การเปรียบเทียบผลของการหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาด โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ และการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ โดยวิธีค่าการหาเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง, รากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสอง และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

จากการทดลองเพื่อหาค่าองค์ประกอบความผิดพลาด โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับได้ผลการทดลองดังนี้

ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X สามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{xx} = -2.23 \times 10^{-7} x^2 + 2.77 \times 10^{-9} x$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0043 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0657 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y สามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{yy} = 7.4 \times 10^{-8} y^2 + 8.02 \times 10^{-10} y$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0002 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0134 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z สามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{zz} = -3.33 \times 10^{-7} z^2 + 7.20 \times 10^{-10} z$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0005 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0229 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X ซึ่งสามารถถูกแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{yx} = -2.47 \times 10^{-7} x^2 + 1.07 \times 10^{-4} x$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.000049 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0070 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X ซึ่งสามารถถูกแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{zx} = -8.69 \times 10^{-7} x^2 + 2.19 \times 10^{-9} x$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.000582 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0241 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ซึ่งสามารถถูกแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{xy} = -4.54 \times 10^{-7} y^2 + 1.04 \times 10^{-9} y$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.000035 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0059 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{zy} = -3.52 \times 10^{-7} y^2 - 7.43 \times 10^{-10} y$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.000021 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.0046 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{xz} = -1.10 \times 10^{-6} z^2 + 2.19 \times 10^{-9} z$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.00042 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.02039 มิลลิเมตร

ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคือ $\delta_{yz} = 3.78 \times 10^{-7} z^2 - 7.43 \times 10^{-10} z$ โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.000029 มิลลิเมตร² และรากที่สองของความผิดพลาดยกกำลังสองเท่ากับ 0.005360 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งการเคลื่อนที่ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยจลนศาสตร์ย้อนกลับในแนวแกน X, Y และ Z จะให้แนวโน้มของค่าความผิดพลาดเป็นไปในทิศทางเดียวกับการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ แต่จะมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมากกว่า โดยที่มีค่าความแม่นยำในแนวแกน X, Y และ Z เท่ากับ -0.0190 mm, 0.0058 mm และ -0.065 mm ตามลำดับและเมื่อทำการเปรียบเทียบผลเพื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เทียบกับการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ในแนวแกน X, Y และ Z พบว่ามีค่าเท่ากับ 19.2 เปอร์เซ็นต์, 68.82 เปอร์เซ็นต์ และ 198.94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแนวแกนนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ คือ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X มีค่าเท่ากับ 24291.81 เปอร์เซ็นต์, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X มีค่าเท่ากับ 4147.77 เปอร์เซ็นต์, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y มีค่าเท่ากับ 12208.50 เปอร์เซ็นต์, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y มีค่าเท่ากับ 51158.56 เปอร์เซ็นต์, ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีค่าเท่ากับ 2345.96 เปอร์เซ็นต์ และความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีค่าเท่ากับ 1219.52 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นชี้ให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ย้อนกลับนั้นจะให้ค่าความผิดพลาดที่มากกว่า แต่ค่าดังกล่าวยังอยู่ในช่วงความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนได้ โดยจะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการประเมินความผิดพลาดน้อยกว่าการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ เพราะการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์นั้นจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญและประสบการณ์ในการวัดด้วย ส่วนความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของแนวแกน เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์พบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งจะต้องทำการพัฒนาเพื่อให้ค่ามีความใกล้เคียงการวัดความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์กับต่อไป

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อทำการประมาณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกนการเคลื่อนที่ $(\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz})$ และค่าความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของการเคลื่อนที่ $(\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz})$ เท่านั้น แต่แนวโน้มของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวิธีการประมาณค่าความผิดพลาดโดยวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันกับวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ แต่ค่าความผิดพลาดที่ได้อาจจะได้ค่าที่มาก เนื่องจากความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนและความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ถูกรวมเข้าอยู่กับค่าความผิดพลาดดังกล่าวที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาเพื่อให้การประมาณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ จึงอาจจะต้องหาค่าความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นมุมฉากระหว่างกันของแกนและความผิดพลาดเนื่องจากแกนการเคลื่อนที่บิดเป็นมุมรอบแกนการเคลื่อนที่ต่อไป เพื่อที่จะสามารถแยกค่าความผิดพลาดดังกล่าวออกจากความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกนการเคลื่อนที่และค่าความผิดพลาดเนื่องจากความตรงของการเคลื่อนที่ รวมทั้งยังต้องหาวิธีการเพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการผลิต (Thermal Errors) และความผิดพลาดอันเนื่องมาจากแรงในการตัดเฉือนในกระบวนการผลิต (Cutting-force Induced Errors) เพื่อให้การประมาณค่าองค์ประกอบของเครื่องจักรซีเอ็นซีมีความถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชนะ รัศมีศิริ. 2549. เอกสารประกอบการสอนวิชาเครื่องจักรกลซีเอ็นซี I. ภาควิชาวิศวกรรม
อุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ฐิติภูมิ ดอกขอ. 2551. การประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัดความกลม.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อัญญาภูมิ เหลืองทองคำ, เรือเอก. 2554. การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการ
สอบเทียบเกจบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- A. C. Okafor, Yalcin. M, Ertekin. 2000. Derivation of Machine Tool Error Models and Error
Compensation Procedure for three axes Vertical Machining Center using Rigid body
kinematics. **Machine Tools & Manufacture** 8 (40): 1199-1213.
- Ahn, K.G., Cho, D.W. 1999. Proposition for a volumetric error model considering backlash in
machine tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 15 (8):
554-561.
- Bancha Ariyajunya. 2002. **Geometric Error Identification and Compensation in Five-Axis
CNC Milling Machines**. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Master of Engineering, Asian Institute of Technology
- Bryan, J. 1982a. Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part I:
Principles and Applications. **Precision Engineering** 2 (4): 61-69.

_____. 1982b. Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part II: Construction details **Precision Engineering** 3 (4): 125-138.

B.W. Ikuu, H. Tanaka, F. Obata and S. Sakamoto. 2001. Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces I: Theoretical analysis. **J. Int. Soc. Precision Eng. Nanotechnology** 25: 266–273.

Chen, J., Ling, C. 1996. Improving the Machine Accuracy through Machine Tool Metrology and Error Correction. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 3 (11): 198-205.

Choi, J. P., Lee, S. J., Kwon, H. D., 2003. Roundness Error Prediction with a Volumetric Error Model Including Spindle Error Motions of a Machine Tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** (21): 923-928.

Florussen G.H.J., Delbressine F.L.M., Van De Molengraft M.J.G., Schellekens P.H.J. 2001. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation** 4 (30): 241-255.

G.M. Kim, B.H. Kim, C.N. Chu, 2003. Estimation of cutter deflection and form error in ball-end milling processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** (43) 917–924.

Guiquan Chen. 2000. **Rapid Volumetric Error Mapping and Compensation for a Three Axis Machine Center**. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for a degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University of Michigan.

I. Huh, J. Yuan, Y. Koren, 1999. Systematic machine tool error identification and compensation through test part. **ASME Dynamic Systems and Control Division** (67): 915-922.

Jie Zhu. 2008. **Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tool**. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University Of Michigan

Jung J.-H., Choi J.-P., Lee S.-J. 2006. Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement. **Journal of Materials Processing Technology** 174 (1-3): 56-66.

K. F. Ehmann, B. T. Wu, M. F. Devries. 1987. A Generalized Geometric Error Model for Multi-Axis Machines. **Annual of CIRP** (361): 253-256

KokKiong Tan, Tong Heng Lee, Sunan Huang. 2008. **Precision motion control: design and implementation**. Springer, New York.

Knapp W. 1983. Circular Test for Three-Coordinate Measuring Machines and Machine Tools. **Precision Engineering** 3 (5): 115-124.

Kruth, J., Vanherck, P. and De Jonge L. 1994. Self-Calibration Method and Software Error Correction for Three-Dimensional Coordinate Measuring Machines Using Artefact Measurements. **Measurement** 2 (14): 157-167.

Mekid S. 2009. **Introduction to precision machine design and error assessment.**
Taylor&Francis Group, LLC, New York.

Mou, J. 1997. A systematic approach to enhance machine tool accuracy for precision manufacturing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 37 (5): 669-685

Mou J, Lui CR. 1995. A methodology for machine tool error correction using reference parts. **Int J computer Integrated Manufacturing** 8 (1): 64-77.

M.Rahman. 2004. **Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy in a software way.** Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu.

N. Hai, J. Yuan, J. Ni. 1994. Reverse kinematic analysis of machine tool error using a telescoping ball bar. **ASME** 68 (1): 277-268.

PB Dhanish and Jose Mathew. 2007. A Fast and Simple Algorithm for Evaluation of Minimum Zone Straightness Error from Coordinate Data. **International Journal for Advanced Manufacturing Technology** (32): 92-98

Ramesh, R., Mannan, M.A., Poo, A.N. 2000. Error compensation in machine tools - a review.

Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 40 (9): 1235-1256.

Raksiri, C., Parnichkun, M. 2004. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 44 (12-13): 1283-1291.

_____. 2002. Kinematic and geometric error verification and compensation of a three axes vertical machining center. **Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology** (2): 1008–1012.

R. Ramesh, Mannan, MA., and Poo, AN. 2003. Thermal error measurement and modeling in machine tools. Part I. Influence of varying operating conditions. **International Journal of Mechanical Tools and Manufactory** (43): 391-404.

Slocum and H.Alexander. 1992. **Precision Machine Design**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Soonns, JA., Theeuws, FC., Schellekens, PH. 1992. Modeling the error of multi-axis machines: a general methodology. **Precision Engineering** 14 (1): 519.

T. Sata, Y. Takeuchi, N. Sato, N. Okubo, 1974. Analysis of thermal deformation of machine tool structure and its application. **Proc.14th International Machine Tool Design and Research Conference** :275–280.

W.Baosheng, H. Hongyan. 2010. Cutting Force Induced Error Prediction and Compensation Base one Feed Servo Motor Current. **Applied Mechanics and Materials** (44 - 47): 879-883.

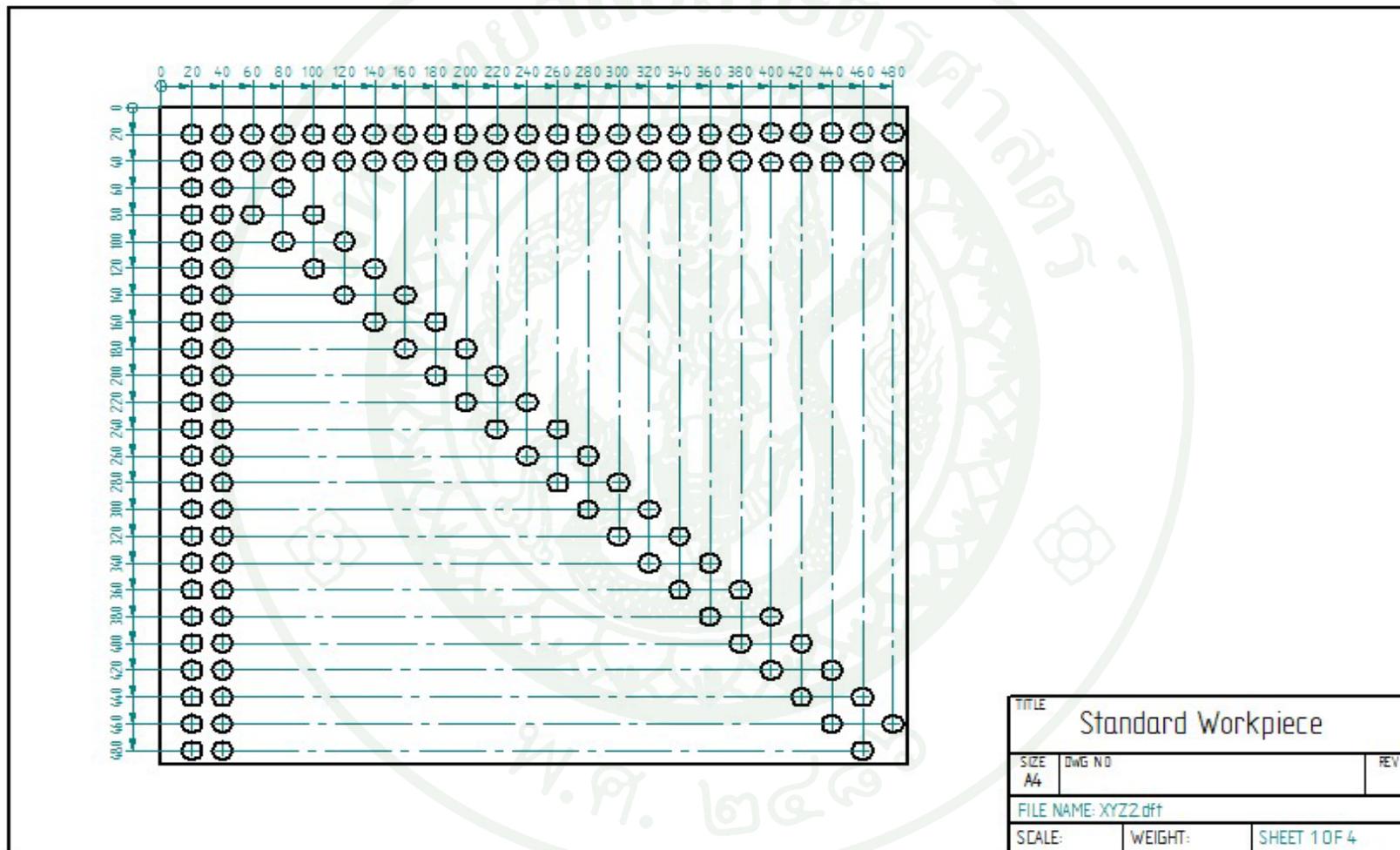
Weck M. 1984. **Handbook of machine tool: Vol. 4 Metrological analysis and performance test**. John Wiley & Sons, Wiley Heyden Ltd, New York.

Zhang, G. and Zang, Y. 1991. A Method for Machine Geometry Calibration Using 1-D Array Ball. **CIRP Annals** 1 (40): 519-522.

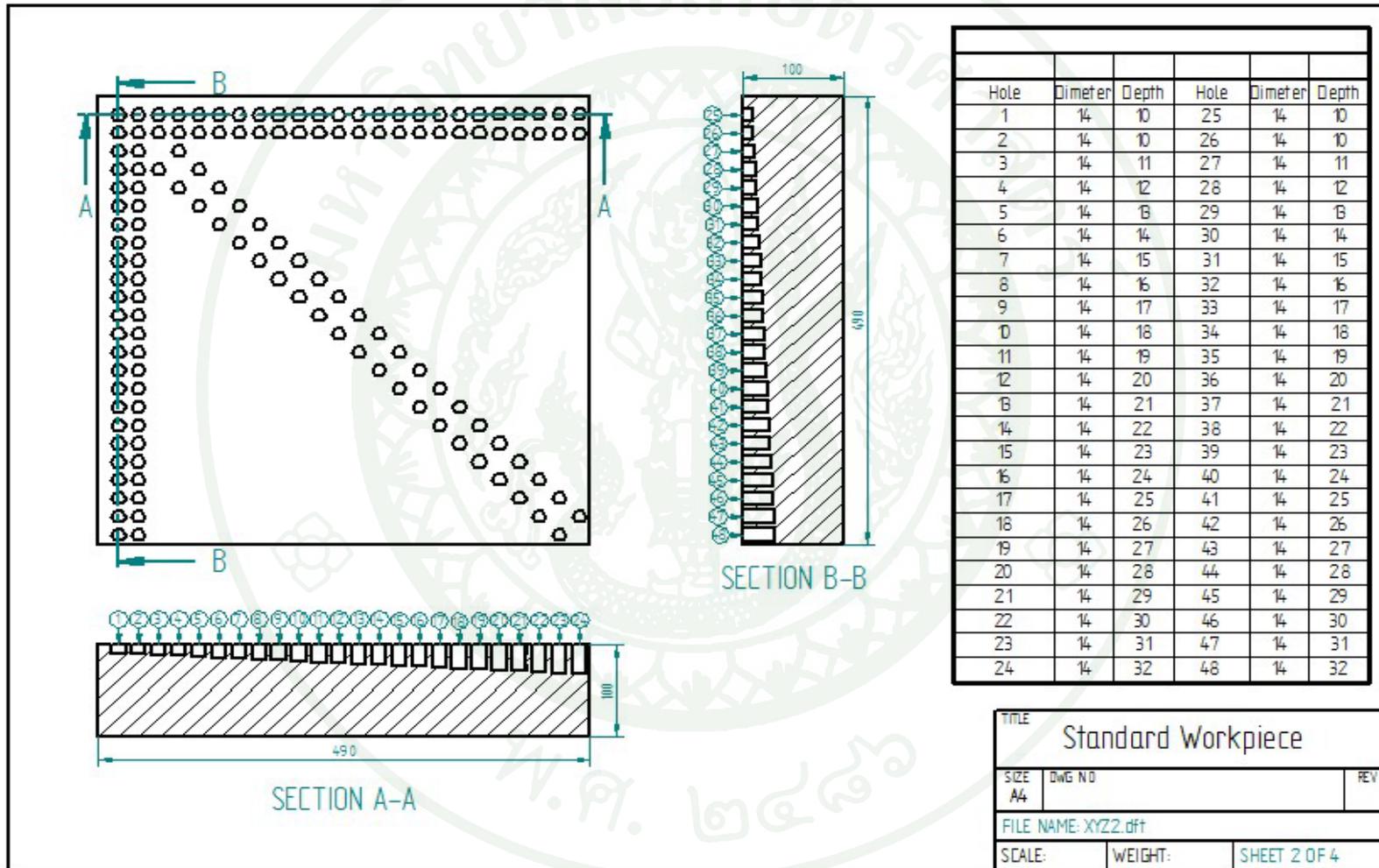


ภาคผนวก

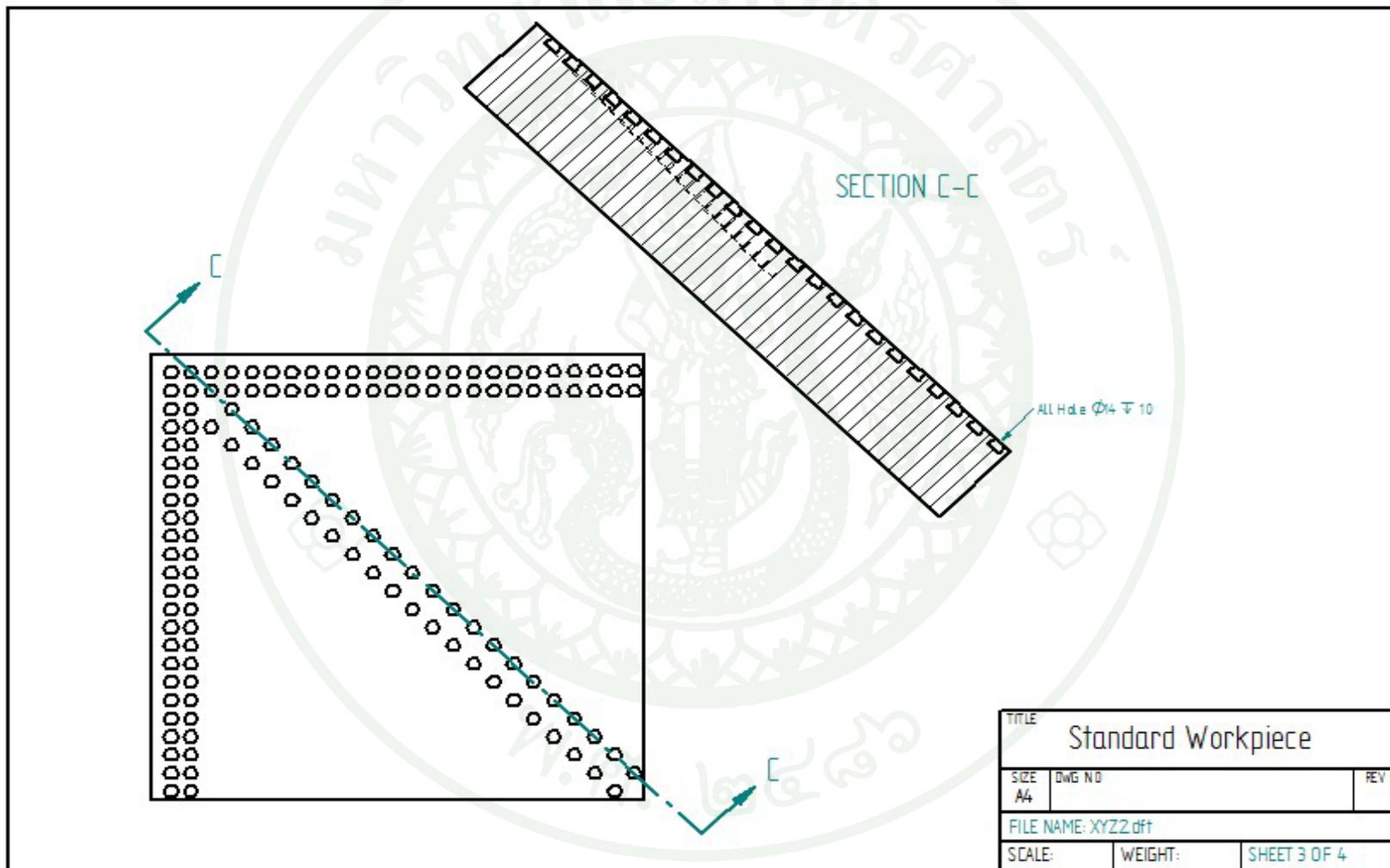




ภาพผนวกที่ ก1 แบบชิ้นงานมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)



จีโค้ดในการจัดชั้นงานมาตรฐาน

1. ระนาบ XZ

%

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-60. Y20. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-60. Y20. Z-11. R5. F25.

G82 X-80. Y20. Z-12. R5.

G82 X-100. Y20. Z-13. R5.

G82 X-120. Y20. Z-14. R5.

G82 X-140. Y20. Z-15. R5.

G82 X-160. Y20. Z-16. R5.

G82 X-180. Y20. Z-17. R5.

G82 X-200. Y20. Z-18. R5.

G82 X-220. Y20. Z-19. R5.

G82 X-240. Y20. Z-20. R5.

G82 X-260. Y20. Z-21. R5.

G82 X-280. Y20. Z-22. R5.

G82 X-300. Y20. Z-23. R5.

G82 X-320. Y20. Z-24. R5.

G82 X-340. Y20. Z-25. R5.

G82 X-360. Y20. Z-26. R5.

G82 X-380. Y20. Z-27. R5.

G82 X-400. Y19. Z-28. R5.

G82 X-420. Y19. Z-29. R5.

G82 X-440. Y19. Z-30. R5.

G82 X-460. Y19. Z-31. R5.

G82 X-480. Y19. Z-32. R5.

G80

G01 Z100. F2000.

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-60. Y40. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-60. Y40. Z-11. R5. F25.

G82 X-80. Y40. Z-12. R5.

G82 X-100. Y40. Z-13. R5.

G82 X-120. Y40. Z-14. R5.

G82 X-140. Y40. Z-15. R5.

G82 X-160. Y40. Z-16. R5.

G82 X-180. Y40. Z-17. R5.

G82 X-200. Y40. Z-18. R5.

G82 X-220. Y40. Z-19. R5.

G82 X-240. Y40. Z-20. R5.

G82 X-260. Y40. Z-21. R5.

G82 X-280. Y40. Z-22. R5.

G82 X-300. Y40. Z-23. R5.

G82 X-320. Y40. Z-24. R5.

G82 X-340. Y40. Z-25. R5.

G82 X-360. Y40. Z-26. R5.

G82 X-380. Y40. Z-27. R5.

G82 X-400. Y41. Z-28. R5.

G82 X-420. Y41. Z-29. R5.

G82 X-440. Y41. Z-30. R5.

G82 X-460. Y41. Z-31. R5.

G82 X-480. Y41. Z-32. R5.

G80

G01 Z100. F2000.

M05

(Machine Time:38.03)

M30

%



1.2 ระบาย YZ

%

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-20. Y20. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-20. Y20. Z-10. R5. F25.

Y40.

G82 X-20. Y60. Z-11. R5.

G82 X-20. Y80. Z-12. R5.

G82 X-20. Y100. Z-13. R5.

G82 X-20. Y120. Z-14. R5.

G82 X-20. Y140. Z-15. R5.

G82 X-20. Y160. Z-16. R5.

G82 X-20. Y180. Z-17. R5.

G82 X-20. Y200. Z-18. R5.

G82 X-20. Y220. Z-19. R5.

G82 X-20. Y240. Z-20. R5.

G82 X-20. Y260. Z-21. R5.

G82 X-20. Y280. Z-22. R5.

G82 X-20. Y300. Z-23. R5.

G82 X-20. Y320. Z-24. R5.

G82 X-20. Y340. Z-25. R5.

G82 X-20. Y360. Z-26. R5.

G82 X-20. Y380. Z-27. R5.

G82 X-20. Y400. Z-28. R5.

G82 X-20. Y420. Z-29. R5.

G82 X-20. Y440. Z-30. R5.

G82 X-20. Y460. Z-31. R5.

G82 X-20. Y480. Z-32. R5.

G80

G01 Z100. F2000.

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-40. Y20. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-40. Y20. Z-10. R5. F25

Y40.

G82 X-40. Y60. Z-11. R5.

G82 X-40. Y80. Z-12. R5.

G82 X-40. Y100. Z-13. R5.

G82 X-40. Y120. Z-14. R5.

G82 X-40. Y140. Z-15. R5.

G82 X-40. Y160. Z-16. R5.

G82 X-40. Y180. Z-17. R5.

G82 X-40. Y200. Z-18. R5.

G82 X-40. Y220. Z-19. R5.

G82 X-40. Y240. Z-20. R5.

G82 X-40. Y260. Z-21. R5.

G82 X-40. Y280. Z-22. R5.

G82 X-40. Y300. Z-23. R5.

G82 X-40. Y320. Z-24. R5.

G82 X-40. Y340. Z-25. R5.

G82 X-40. Y360. Z-26. R5.

G82 X-40. Y380. Z-27. R5.

G82 X-40. Y400. Z-28. R5.

G82 X-40. Y420. Z-29. R5.

G82 X-40. Y440. Z-30. R5.

G82 X-40. Y460. Z-31. R5.

G82 X-40. Y480. Z-32. R5.

G80

G01 Z100. F2000.

M05

(Machine Time:39.62)

M30

%



1.3 ระบาย XY

%

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-80. Y60. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-80. Y60. Z-10. R5. F25.

X-100. Y80.

X-120. Y100.

X-140. Y120.

X-160. Y140.

X-180. Y160.

X-200. Y180.

X-220. Y200.

X-240. Y220.

X-260. Y240.

X-280. Y260.

X-300. Y280.

X-320. Y300.

X-340. Y320.

X-360. Y340.

X-380. Y360.

X-400. Y380.

X-420. Y400.

X-440. Y420.

X-460. Y440.

X-480. Y460.

G80

G01 Z100. F2000.

G91 G28 G00 X0 Y0 Z0.0

G54

T01 M06

G01 G90 X-60. Y80. F2000. S500 M03

G43 H1 Z10.

G82 X-60. Y80. Z-10. R5. F25.

X-80. Y100.

X-100. Y120.

X-120. Y140.

X-140. Y160.

X-160. Y180.

X-180. Y200.

X-200. Y220.

X-220. Y240.

X-240. Y260.

X-260. Y280.

X-280. Y300.

X-300. Y320.

X-320. Y340.

X-340. Y360.

X-360. Y380.

X-380. Y400.

X-400. Y420.

X-420. Y440.

X-440. Y460.

X-460. Y480.

G80

G01 Z100. F2000.

M05

(Machine Time:17.05)

M30

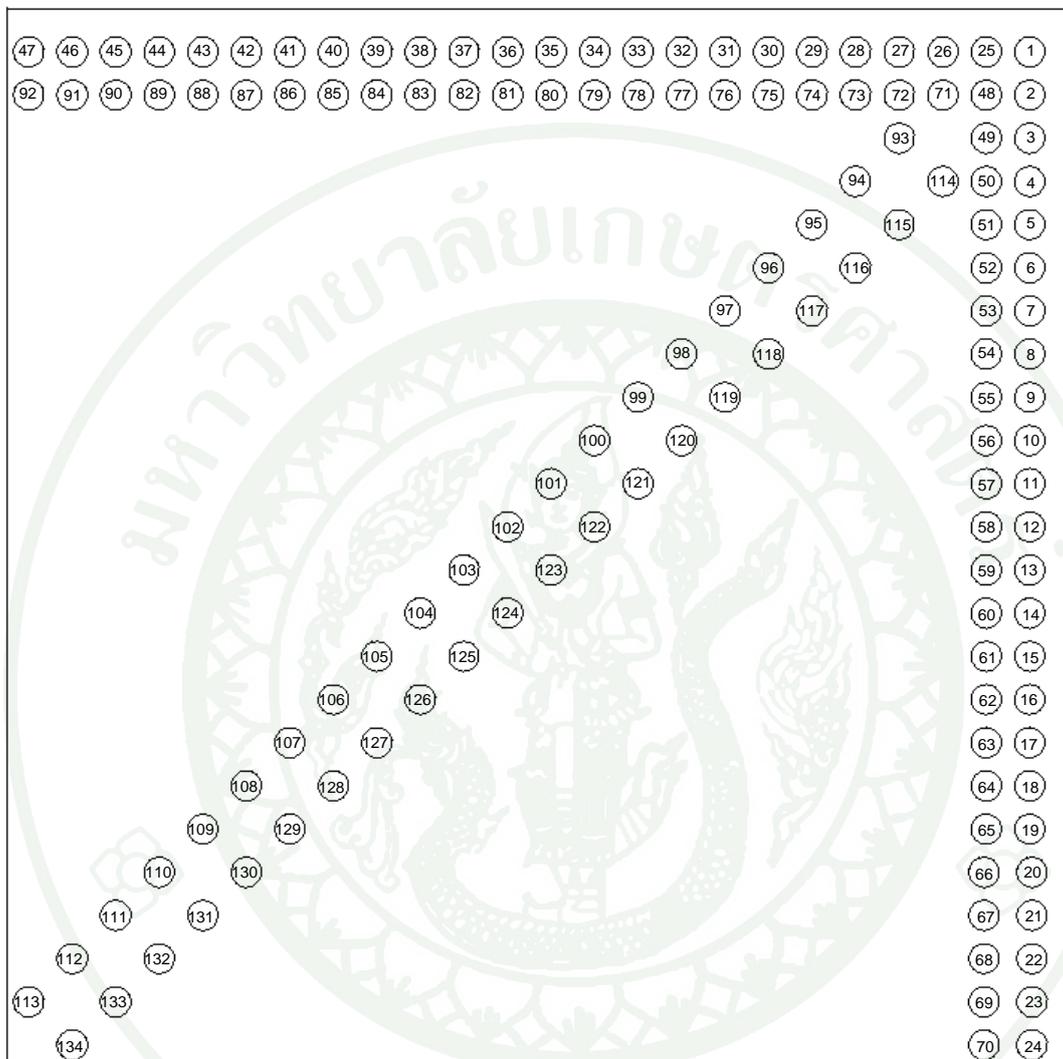
%



ภาคผนวก ค

ลำดับการวัดและผลการวัดตำแหน่งชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

1. ลำดับการวัดชิ้นงานมาตรฐานและตำแหน่งที่ทำการออกแบบ



ภาพผนวกที่ ค1 ลำดับการวัดชิ้นงานมาตรฐาน

ตารางผนวกที่ ค1 ตำแหน่งของชิ้นงานมาตรฐานที่ทำการออกแบบไว้

ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ			ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ		
	แกน X	แกน Y	แกน Z		แกน X	แกน Y	แกน Z
1	20	20	-10	25	20	40	-10
2	40	20	-10	26	20	60	-11
3	60	20	-11	27	20	80	-12
4	80	20	-12	28	20	100	-13
5	100	20	-13	29	20	120	-14
6	120	20	-14	30	20	140	-15
7	140	20	-15	31	20	160	-16
8	160	20	-16	32	20	180	-17
9	180	20	-17	33	20	200	-18
10	200	20	-18	34	20	220	-19
11	220	20	-19	35	20	240	-20
12	240	20	-20	36	20	260	-21
13	260	20	-21	37	20	280	-22
14	280	20	-22	38	20	300	-23
15	300	20	-23	39	20	320	-24
16	320	20	-24	40	20	340	-25
17	340	20	-25	41	20	360	-26
18	360	20	-26	42	20	380	-27
19	380	20	-27	43	20	400	-28
20	400	20	-28	44	20	420	-29
21	420	20	-29	45	20	440	-30
22	440	20	-30	46	20	460	-31
23	460	20	-31	47	20	480	-32
24	480	20	-32	48	40	40	-10

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ			ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ		
	แกน X	แกน Y	แกน Z		แกน X	แกน Y	แกน Z
49	60	40	-11	72	40	80	-12
50	80	40	-12	73	40	100	-13
51	100	40	-13	74	40	120	-14
52	120	40	-14	75	40	140	-15
53	140	40	-15	76	40	160	-16
54	160	40	-16	77	40	180	-17
55	180	40	-17	78	40	200	-18
56	200	40	-18	79	40	220	-19
57	220	40	-19	80	40	240	-20
58	240	40	-20	81	40	260	-21
59	260	40	-21	82	40	280	-22
60	280	40	-22	83	40	300	-23
61	300	40	-23	84	40	320	-24
62	320	40	-24	85	40	340	-25
63	340	40	-25	86	40	360	-26
64	360	40	-26	87	40	380	-27
65	380	40	-27	88	40	400	-28
66	400	40	-28	89	40	420	-29
67	420	40	-29	90	40	440	-30
68	440	40	-30	91	40	460	-31
69	460	40	-31	92	40	480	-32
70	480	40	-32	93	60	80	-10
71	40	60	-11	94	80	100	-10

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ			ลำดับของรู	ตำแหน่งที่ทำการออกแบบ		
	แกน X	แกน Y	แกน Z		แกน X	แกน Y	แกน Z
95	100	120	-10	118	160	140	-10
96	120	140	-10	119	180	160	-10
97	140	160	-10	120	200	180	-10
98	160	180	-10	121	220	200	-10
99	180	200	-10	122	240	220	-10
100	200	220	-10	123	260	240	-10
101	220	240	-10	124	280	260	-10
102	240	260	-10	125	300	280	-10
103	260	280	-10	126	320	300	-10
104	280	300	-10	127	340	320	-10
105	300	320	-10	128	360	340	-10
106	320	340	-10	129	380	360	-10
107	340	360	-10	130	400	380	-10
108	360	380	-10	131	420	400	-10
109	380	400	-10	132	440	420	-10
110	400	420	-10	133	460	440	-10
111	420	440	-10	134	480	460	-10
112	440	460	-10				
113	460	480	-10				
114	80	60	-10				
115	100	80	-10				
116	120	100	-10				
117	140	120	-10				

2. ผลการวัดตำแหน่งชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการวัดตำแหน่งชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
1	19.92847	19.95738	19.95873	19.9442	20.00067	20.00376	-9.82602	-9.82016	-9.81803
2	39.92756	39.9548	39.95641	19.9382	19.99502	19.99803	-9.82393	-9.81839	-9.81655
3	59.92711	59.95247	59.95397	19.93589	19.99319	19.99625	-10.81298	-10.80808	-10.80647
4	79.93247	79.95576	79.9571	19.93618	19.99383	19.99694	-11.81839	-11.81385	-11.81242
5	99.93446	99.95503	99.95615	19.93574	19.99372	19.99689	-12.81942	-12.81512	-12.81379
6	119.93487	119.95253	119.95352	19.93424	19.99242	19.99566	-13.81741	-13.81348	-13.81231
7	139.93633	139.95142	139.95223	19.93244	19.99057	19.9939	-14.82047	-14.81687	-14.81585
8	159.93797	159.94991	159.95056	19.93028	19.98839	19.99174	-15.82333	-15.81989	-15.81897
9	179.93888	179.94858	179.94905	19.92846	19.98653	19.98994	-16.82539	-16.8222	-16.82137

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
10	199.94081	199.94667	199.94696	19.92731	19.98529	19.98872	-17.82796	-17.82495	-17.82419
11	219.94256	219.9462	219.94626	19.92542	19.98316	19.98659	-18.827	-18.82416	-18.8235
12	239.9448	239.94578	239.94573	19.92405	19.98132	19.98474	-19.82943	-19.82654	-19.8259
13	259.94725	259.94511	259.94482	19.92324	19.98014	19.98352	-20.83378	-20.83093	-20.8303
14	279.94834	279.94327	279.94279	19.92184	19.97843	19.98185	-21.83373	-21.8309	-21.83026
15	299.95044	299.94274	299.94215	19.92102	19.97696	19.98036	-22.83611	-22.83327	-22.83257
16	319.952	319.94117	319.94045	19.92009	19.9755	19.97892	-23.83911	-23.83624	-23.8355
17	339.95519	339.94224	339.94138	19.91933	19.97402	19.97725	-24.84182	-24.8389	-24.83804
18	359.9575	359.94178	359.94086	19.918	19.97198	19.97511	-25.8419	-25.83894	-25.83806
19	379.95945	379.94171	379.94068	19.91715	19.97028	19.97335	-26.84336	-26.84025	-26.83932
20	399.96006	399.93962	399.93847	18.91674	18.969	18.97189	-27.85147	-27.8481	-27.84697
21	419.96077	419.93812	419.93683	18.91624	18.96714	18.96993	-28.85634	-28.85283	-28.85167

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
22	439.96139	439.93739	439.93605	18.91403	18.96374	18.96646	-29.85595	-29.85219	-29.85082
23	459.96337	459.93777	459.93641	18.91161	18.95989	18.96248	-30.85825	-30.85414	-30.85265
24	479.95879	479.93291	479.93141	18.90873	18.95646	18.95895	-31.85973	-31.85535	-31.85365
25	19.92986	19.95672	19.95822	39.95755	40.0078	40.01052	-9.82861	-9.8243	-9.82293
26	19.93051	19.95836	19.95993	59.95695	60.00513	60.00776	-10.83204	-10.82852	-10.82753
27	19.92978	19.9587	19.96026	79.95584	80.00183	80.00432	-11.83575	-11.83287	-11.8321
28	19.93028	19.95986	19.96145	99.95407	99.99749	99.99989	-12.83964	-12.83734	-12.8369
29	19.93093	19.96118	19.96282	119.9547	119.99533	119.99758	-13.84447	-13.84263	-13.84232
30	19.9303	19.96089	19.96255	139.95494	139.99297	139.99507	-14.83703	-14.8356	-14.83545
31	19.93018	19.96116	19.96291	159.95521	159.99055	159.99247	-15.83508	-15.83406	-15.83415
32	19.9305	19.96167	19.96339	179.9563	179.9888	179.99053	-16.83676	-16.83616	-16.83641
33	19.93127	19.96249	19.96418	199.95675	199.98645	199.98801	-17.83975	-17.83938	-17.83986

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
34	19.93195	19.96308	19.96478	219.95687	219.98356	219.98496	-18.84015	-18.84007	-18.84049
35	19.93408	19.96513	19.96685	239.95672	239.98052	239.98171	-19.84557	-19.84572	-19.8462
36	19.93493	19.96568	19.96735	259.95807	259.97903	259.98008	-20.84511	-20.84549	-20.84605
37	19.93717	19.96757	19.96919	279.95788	279.9761	279.97693	-21.84585	-21.84633	-21.84692
38	19.93653	19.96646	19.968	299.95929	299.97478	299.97549	-22.84549	-22.84605	-22.84668
39	19.93396	19.9634	19.96488	319.96061	319.97344	319.974	-23.84922	-23.84984	-23.8505
40	19.9339	19.96261	19.96401	339.96286	339.97309	339.97352	-24.85997	-24.86059	-24.86119
41	19.93475	19.96273	19.96405	359.96662	359.97433	359.9746	-25.86503	-25.86569	-25.86625
42	19.93627	19.96332	19.96453	379.96924	379.97445	379.9746	-26.86949	-26.8701	-26.87061
43	19.9397	19.9658	19.96694	399.97062	399.97354	399.97352	-27.87377	-27.87428	-27.87471
44	19.94296	19.96784	19.9689	419.9731	419.97365	419.97345	-28.87771	-28.87812	-28.87845
45	19.94867	19.97226	19.9732	439.97317	439.97185	439.97157	-29.88202	-29.88223	-29.88248

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
46	19.95311	19.97542	19.97634	459.9756	459.97288	459.97256	-30.88887	-30.88881	-30.88894
47	19.95443	19.97589	19.9767	479.97517	479.9714	479.97107	-31.89109	-31.89071	-31.8907
48	39.93008	39.9537	39.95468	39.95536	40.00137	40.00361	-9.82254	-9.8194	-9.81884
49	59.93384	59.95507	59.95591	39.94777	39.99415	39.99641	-10.80298	-10.80034	-10.79999
50	79.93896	79.95835	79.95918	39.94758	39.99428	39.99661	-11.8055	-11.80329	-11.80332
51	99.93905	99.95645	99.95723	39.94465	39.99157	39.99396	-12.80787	-12.80617	-12.80623
52	119.94054	119.95566	119.95632	39.94362	39.99078	39.99325	-13.80918	-13.80764	-13.80771
53	139.94124	139.95366	139.95415	39.94184	39.98931	39.99179	-14.81217	-14.81071	-14.81088
54	159.94321	159.95353	159.95383	39.9402	39.98745	39.98995	-15.81419	-15.81286	-15.81308
55	179.9433	179.95139	179.95161	39.93993	39.98716	39.98963	-16.81306	-16.81186	-16.81214
56	199.94493	199.95067	199.95072	39.93771	39.98493	39.98742	-17.81576	-17.81464	-17.81498
57	219.94627	219.94965	219.9496	39.93632	39.98348	39.98597	-18.81596	-18.81507	-18.81545

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
58	239.94747	239.94826	239.94804	39.93462	39.98142	39.98391	-19.81682	-19.81585	-19.81623
59	259.94879	259.94691	259.94655	39.93285	39.97938	39.9818	-20.82041	-20.81939	-20.81978
60	279.95097	279.94707	279.94661	39.93189	39.97808	39.98049	-21.82263	-21.82159	-21.82195
61	299.95281	299.94649	299.94584	39.93069	39.97632	39.9787	-22.82169	-22.82068	-22.82108
62	319.95462	319.94579	319.94498	39.93005	39.97514	39.97752	-23.82779	-23.82662	-23.82693
63	339.95716	339.94611	339.94521	39.92913	39.97378	39.97607	-24.82848	-24.82731	-24.82762
64	359.95863	359.94534	359.94438	39.92908	39.97314	39.97542	-25.8283	-25.82704	-25.8273
65	379.96123	379.94599	379.94486	39.92761	39.97104	39.97327	-26.83047	-26.82898	-26.82913
66	399.96031	399.9428	399.94174	40.93358	40.97565	40.97785	-27.83891	-27.83727	-27.83732
67	419.96045	419.94124	419.93997	40.9331	40.97464	40.97678	-28.84256	-28.84071	-28.84061
68	439.9624	439.94147	439.94013	40.93247	40.97283	40.97485	-29.84338	-29.84131	-29.8411
69	459.96198	459.93994	459.9385	40.9315	40.97106	40.97303	-30.8474	-30.84502	-30.8446

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
70	479.95682	479.93422	479.93278	40.93044	40.96941	40.97135	-31.84705	-31.84434	-31.8437
71	-14.13298	39.95323	39.95404	59.95893	59.99962	60.00164	-10.82395	-10.82181	-10.82159
72	39.93096	39.95354	39.95448	79.95769	79.9963	79.99825	-11.82734	-11.82583	-11.82587
73	39.93043	39.95351	39.95449	99.956	99.99264	99.99448	-12.82942	-12.82832	-12.82852
74	39.92955	39.95337	39.9544	119.95679	119.99092	119.99263	-13.82813	-13.82746	-13.82785
75	39.92995	39.95399	39.95504	139.95748	139.98938	139.99099	-14.82907	-14.8287	-14.82925
76	39.93105	39.95535	39.95644	159.95642	159.98598	159.98747	-15.82985	-15.82969	-15.83047
77	39.931	39.95538	39.9565	179.95731	179.98447	179.98582	-16.8286	-16.82874	-16.82953
78	39.93156	39.95591	39.95705	199.95874	199.98344	199.98462	-17.83227	-17.83259	-17.83346
79	39.93255	39.95678	39.95797	219.95769	219.98029	219.98136	-18.83357	-18.83409	-18.83524
80	39.9333	39.95775	39.95893	239.95904	239.97904	239.97997	-19.83352	-19.83413	-19.83531
81	39.93483	39.95904	39.96017	259.96047	259.97818	259.97901	-20.83395	-20.8347	-20.83591

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
82	39.93695	39.96092	39.96196	279.96112	279.97623	279.9769	-21.83592	-21.83667	-21.8378
83	39.93868	39.96212	39.96311	299.96294	299.97581	299.97634	-22.84069	-22.84159	-22.84274
84	39.94147	39.9646	39.96554	319.96586	319.9765	319.97691	-23.84409	-23.84508	-23.84621
85	39.94372	39.96628	39.96716	339.96594	339.97428	339.97456	-24.84627	-24.84723	-24.84827
86	39.94799	39.96997	39.97081	359.9677	359.97382	359.97402	-25.84657	-25.84754	-25.84855
87	39.95225	39.97346	39.97421	379.96682	379.97076	379.97089	-26.84678	-26.84767	-26.84863
88	39.95509	39.97554	39.97623	399.96782	399.96972	399.96975	-27.85324	-27.85399	-27.85482
89	39.95864	39.97814	39.97878	419.96919	419.96903	419.96898	-28.85619	-28.85679	-28.85754
90	39.96209	39.9806	39.98118	439.96896	439.96709	439.96698	-29.85999	-29.86039	-29.861
91	39.9644	39.9821	39.98267	459.96785	459.96474	459.96459	-30.86313	-30.86332	-30.86377
92	39.96695	39.98415	39.98468	479.96742	479.96366	479.96348	-31.865	-31.86477	-31.86503
93	59.93137	59.95072	59.9514	79.94821	79.98409	79.98588	-9.78856	-9.78753	-9.78793

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
94	79.93479	79.9528	79.95341	99.95612	99.98997	99.99169	-9.79155	-9.79129	-9.79201
95	99.93658	99.95237	99.95294	119.9552	119.98695	119.98858	-9.79307	-9.79351	-9.79457
96	119.93851	119.95299	119.9535	139.95443	139.98373	139.98524	-9.79313	-9.79418	-9.79549
97	139.94105	139.95302	139.95345	159.95421	159.98137	159.98275	-9.79246	-9.79394	-9.7954
98	159.94394	159.95362	159.95397	179.95374	179.97838	179.97958	-9.79343	-9.79531	-9.79683
99	179.94706	179.95454	179.95473	199.95252	199.97488	199.97595	-9.797	-9.79909	-9.80074
100	199.94876	199.95407	199.95411	219.95103	219.9709	219.97182	-9.79657	-9.79889	-9.80056
101	219.9525	219.9555	219.95552	239.95164	239.969	239.96978	-9.79601	-9.79844	-9.80017
102	239.95484	239.95584	239.95567	259.95257	259.96751	259.96817	-9.79559	-9.79809	-9.79983
103	259.96059	259.95915	259.95883	279.94861	279.96128	279.96184	-9.79508	-9.79764	-9.79938
104	279.96125	279.95796	279.9576	299.95003	299.96048	299.96089	-9.79755	-9.80001	-9.80173
105	299.96247	299.9572	299.95669	319.95052	319.9587	319.95897	-9.79726	-9.79972	-9.80134

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรัฐ	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
106	319.96648	319.95928	319.95873	339.9508	339.95678	339.957	-9.79684	-9.7992	-9.80072
107	339.96942	339.96049	339.95982	359.95016	359.95409	359.95417	-9.79802	-9.80028	-9.80161
108	359.97187	359.9612	359.96043	379.94954	379.95123	379.95123	-9.79594	-9.79804	-9.79927
109	379.97357	379.96137	379.9606	399.94752	399.94748	399.94744	-9.79375	-9.79552	-9.79657
110	399.9747	399.96102	399.96024	419.94703	419.94527	419.9452	-9.79434	-9.7957	-9.79662
111	419.97497	419.96025	419.95942	439.94323	439.94032	439.94022	-9.79324	-9.79422	-9.79494
112	439.97498	439.95962	439.95876	459.94066	459.9369	459.93685	-9.7887	-9.7891	-9.78968
113	459.97505	459.95912	459.95822	479.9359	479.93183	479.93188	-9.78227	-9.78233	-9.7826
114	79.93081	79.94646	79.94713	59.95094	59.98611	59.98779	-9.79134	-9.7902	-9.7905
115	99.93658	99.95061	99.95124	79.95732	79.99119	79.99283	-9.79464	-9.79428	-9.7949
116	119.93653	119.9487	119.94928	99.95511	99.98702	99.98856	-9.79584	-9.79618	-9.79712
117	139.93867	139.9493	139.94977	119.95464	119.98446	119.98591	-9.79601	-9.79683	-9.79798

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรัฐ	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
118	159.94078	159.94932	159.94971	139.95351	139.9812	139.98255	-9.79815	-9.79938	-9.80074
119	179.94337	179.9499	179.95015	159.95239	159.97774	159.97892	-9.79984	-9.8015	-9.80303
120	199.94615	199.95045	199.95052	179.94999	179.9732	179.97429	-9.79832	-9.80029	-9.8019
121	219.94957	219.95212	219.95204	199.94982	199.97062	199.97161	-9.80052	-9.8027	-9.80435
122	239.95085	239.95163	239.95148	219.94965	219.96814	219.96898	-9.79823	-9.80055	-9.80219
123	259.95557	259.95418	259.95383	239.94815	239.9644	239.96515	-9.79964	-9.80208	-9.80368
124	279.95723	279.95382	279.95336	259.94708	259.96117	259.9618	-9.79996	-9.8024	-9.804
125	299.95842	299.95325	299.95266	279.94838	279.96038	279.96089	-9.79781	-9.80025	-9.80185
126	319.96117	319.95398	319.95322	299.94626	299.95623	299.95664	-9.79918	-9.80157	-9.80317
127	339.96402	339.95504	339.95422	319.94542	319.95339	319.95371	-9.79722	-9.79958	-9.80111
128	359.96689	359.95611	359.95518	339.94442	339.95057	339.95078	-9.79644	-9.79864	-9.80004
129	379.96898	379.9566	379.95564	359.94442	359.94851	359.94864	-9.79756	-9.79956	-9.80079

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับของรู	ตำแหน่งการวัด								
	แกน X			แกน Y			แกน Z		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
130	399.97107	399.95722	399.95622	379.94203	379.94446	379.94445	-9.79625	-9.79808	-9.79918
131	419.96997	419.95501	419.95401	399.94059	399.94141	399.94138	-9.79417	-9.79562	-9.79652
132	439.97201	439.95634	439.95553	419.93843	419.93789	419.93786	-9.79237	-9.79337	-9.79409
133	459.97147	459.95571	459.95474	439.93438	439.93281	439.93276	-9.78753	-9.78812	-9.78866
134	479.96827	479.95278	479.95187	459.93231	459.92967	459.92967	-9.78126	-9.78146	-9.78174



ภาคผนวก

การประมาณค่าองค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসনศาสตร์ย้อนกลับ

1. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ ง1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวิเคราะห์
 จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด	ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด
0	0	400	-0.036
20	0.000	420	-0.039
40	0.000	440	-0.043
60	-0.001	460	-0.047
80	-0.001	480	-0.051
100	-0.002	500	-0.056
120	-0.003	520	-0.060
140	-0.004	540	-0.065
160	-0.006	560	-0.070
180	-0.007	580	-0.075
200	-0.009	600	-0.080
220	-0.011	620	-0.086
240	-0.013	640	-0.091
260	-0.015	660	-0.097
280	-0.017	680	-0.103
300	-0.020	700	-0.109
320	-0.023	720	-0.116
340	-0.026	740	-0.122
360	-0.029	760	-0.129
380	-0.032	780	-0.136

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
800	-0.143	920	-0.189
820	-0.150	940	-0.197
840	-0.157	960	-0.206
860	-0.165	980	-0.214
880	-0.173	1000	-0.223
900	-0.181		

2. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ง2 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์
 จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด	ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด
0	0	-400	0.012
-20	0.000	-420	0.013
-40	0.000	-440	0.014
-60	0.000	-460	0.016
-80	0.000	-480	0.017
-100	0.001		
-120	0.001		
-140	0.001		
-160	0.002		
-180	0.002		
-200	0.003		
-220	0.004		
-240	0.004		
-260	0.005		
-280	0.006		
-300	0.007		
-320	0.008		
-340	0.009		
-360	0.010		
-380	0.011		

3. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ 3 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์
จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด	ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความ ผิดพลาด
0	0.000	-400	-0.053
-20	0.000	-420	-0.059
-40	-0.001	-440	-0.064
-60	-0.001	-460	-0.070
-80	-0.002	-480	-0.077
-100	-0.003		
-120	-0.005		
-140	-0.007		
-160	-0.009		
-180	-0.011		
-200	-0.013		
-220	-0.016		
-240	-0.019		
-260	-0.023		
-280	-0.026		
-300	-0.030		
-320	-0.034		
-340	-0.039		
-360	-0.043		
-380	-0.048		

4. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ ๔ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X
โดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃত্য้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.01430	380	0.00631
20	-0.01144	400	0.00542
40	-0.00878	420	0.00434
60	-0.00631	440	0.00306
80	-0.00404	460	0.00158
100	-0.00197	480	-0.00010
120	-0.00010	500	-0.00197
140	0.00158	520	-0.00404
160	0.00306	540	-0.00631
180	0.00434	560	-0.00878
200	0.00542	580	-0.01144
220	0.00631	600	-0.01430
240	0.00700		
260	0.00749		
280	0.00779		
300	0.00789		
320	0.00779		
340	0.00749		
360	0.00700		

5. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ 5 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X
โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.05040	400	0.01912
20	-0.04032	420	0.01529
40	-0.03093	440	0.01077
60	-0.02224	460	0.00556
80	-0.01425	480	-0.00035
100	-0.00695	500	-0.00695
120	-0.00035	520	-0.01425
140	0.00556	540	-0.02224
160	0.01077	560	-0.03093
180	0.01529	580	-0.04032
200	0.01912	600	-0.05040
220	0.02224		
240	0.02468		
260	0.02641		
280	0.02746		
300	0.02781		
320	0.02746		
340	0.02641		
360	0.02468		
380	0.02224		

6. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ 6 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃত্য้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.01150
-20	-0.00805
-40	-0.00496
-60	-0.00224
-80	0.00012
-100	0.00212
-120	0.00375
-140	0.00502
-160	0.00593
-180	0.00648
-200	0.00666
-220	0.00648
-240	0.00593
-260	0.00502
-280	0.00375
-300	0.00212
-320	0.00012
-340	-0.00224
-360	-0.00496
-380	-0.00805
-400	-0.01150

7. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ 7 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y
โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.00891
-20	-0.00624
-40	-0.00385
-60	-0.00174
-80	0.00009
-100	0.00164
-120	0.00291
-140	0.00389
-160	0.00460
-180	0.00502
-200	0.00516
-220	0.00502
-240	0.00460
-260	0.00389
-280	0.00291
-300	0.00164
-320	0.00009
-340	-0.00174
-360	-0.00385
-380	-0.00624
-400	-0.00891

8. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ 8 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.03716
-20	-0.02747
-40	-0.01866
-60	-0.01072
-80	-0.00367
-100	0.00250
-120	0.00779
-140	0.01219
-160	0.01572
-180	0.01836
-200	0.02012
-220	0.02101
-240	0.02101
-260	0.02012
-280	0.01836
-300	0.01572
-320	0.01219
-340	0.00779
-360	0.00250
-380	-0.00367
-400	-0.01072

ตารางผนวกที่ ๓๘ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
-420	-0.01866
-440	-0.02747
-460	-0.03716



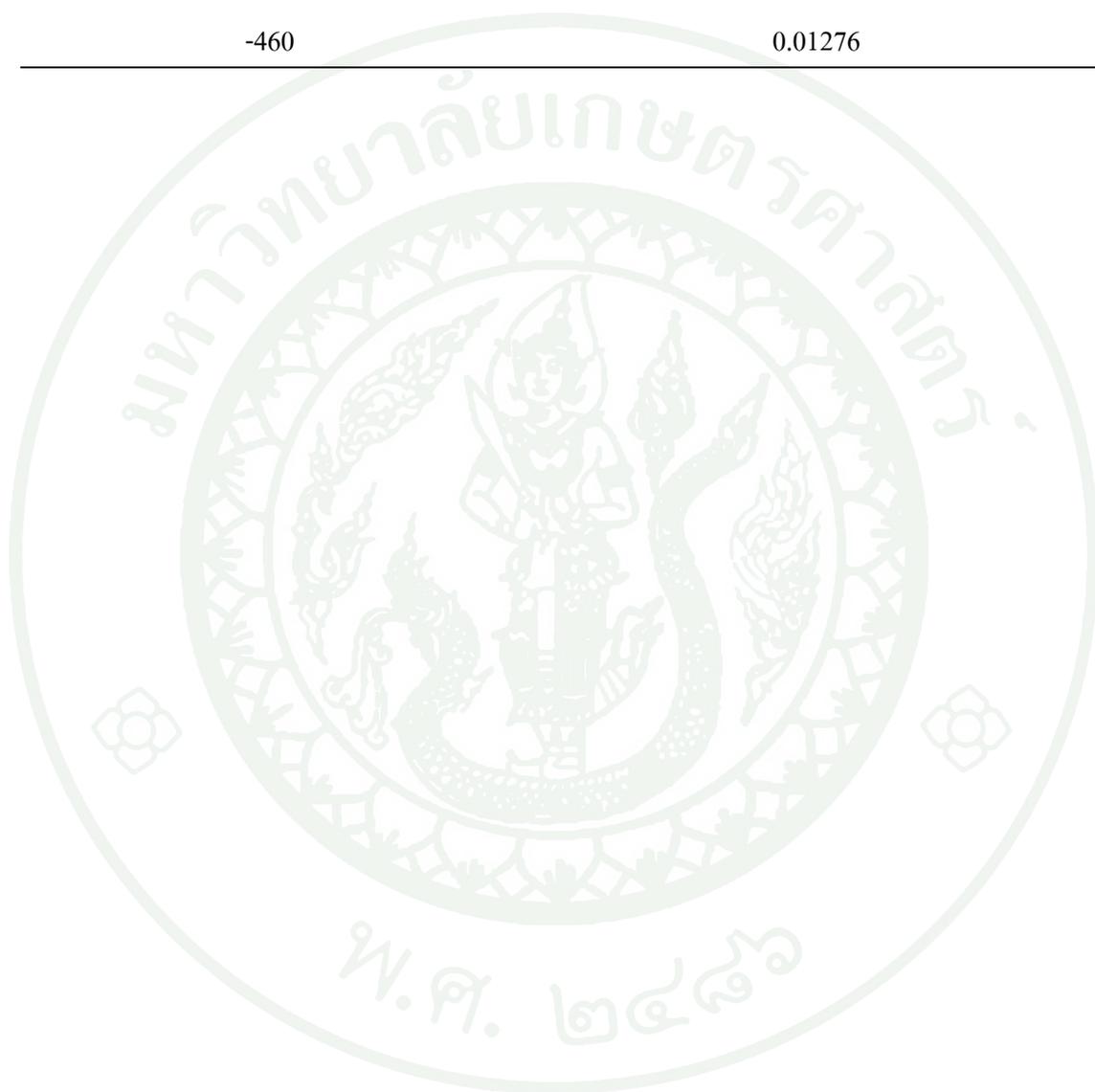
9. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ 9 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z
โดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃতย้อนกลับ

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0.01276
-20	0.00943
-40	0.00641
-60	0.00368
-80	0.00126
-100	-0.00086
-120	-0.00267
-140	-0.00419
-160	-0.00540
-180	-0.00630
-200	-0.00691
-220	-0.00721
-240	-0.00721
-260	-0.00691
-280	-0.00630
-300	-0.00540
-320	-0.00419
-340	-0.00267
-360	-0.00086
-380	0.00126
-400	0.00368

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
-420	0.00641
-440	0.00943
-460	0.01276





ภาคผนวก จ

ผลการวัดองค์ประกอบความผิดพลาดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

1. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ จ1 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0	380	-0.029
20	-0.013	400	-0.030
40	-0.014	420	-0.032
60	-0.015	440	-0.033
80	-0.017	460	-0.033
100	-0.017	480	-0.034
120	-0.019	500	-0.036
140	-0.021	520	-0.036
160	-0.021	540	-0.037
180	-0.021	560	-0.039
200	-0.021	580	-0.039
220	-0.023	600	-0.040
240	-0.023	620	-0.041
260	-0.025	640	-0.043
280	-0.025	660	-0.045
300	-0.027	680	-0.047
320	-0.026	700	-0.048
340	-0.027	720	-0.048
360	-0.028	740	-0.049

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
760	-0.050	900	-0.059
780	-0.052	920	-0.059
800	-0.053	940	-0.060
820	-0.054	960	-0.060
840	-0.056	980	-0.061
860	-0.056	1000	-0.062
880	-0.057		

2. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ จ2 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0	-380	0.022
-20	0.013	-400	0.022
-40	0.014	-420	0.022
-60	0.015	-440	0.022
-80	0.015	-460	0.022
-100	0.017	-480	0.023
-120	0.017		
-140	0.017		
-160	0.018		
-180	0.018		
-200	0.019		
-220	0.020		
-240	0.020		
-260	0.021		
-280	0.021		
-300	0.021		
-320	0.021		
-340	0.022		
-360	0.021		

3. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ จ3 ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0	-380	-0.019
-20	-0.007	-400	-0.018
-40	-0.004	-420	-0.021
-60	-0.004	-440	-0.023
-80	-0.006	-460	-0.021
-100	-0.005	-480	-0.022
-120	-0.005		
-140	-0.008		
-160	-0.006		
-180	-0.007		
-200	-0.009		
-220	-0.007		
-240	-0.010		
-260	-0.013		
-280	-0.011		
-300	-0.013		
-320	-0.016		
-340	-0.015		
-360	-0.017		

4. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ จ4 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.000053	380	-0.000042
20	-0.000158	400	-0.000007
40	-0.000103	420	0.000049
60	-0.000027	440	0.000004
80	0.000008	460	-0.000041
100	0.000103	480	0.000015
120	0.000059	500	0.000030
140	0.000074	520	-0.000015
160	-0.000011	540	0.000041
180	0.000005	560	-0.000084
200	0.000060	580	0.000031
220	0.000115	600	-0.000073
240	0.000091		
260	0.000026		
280	0.000021		
300	-0.000043		
320	-0.000028		
340	-0.000013		
360	-0.000037		

5. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ ๖5 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.001015	400	0.001360
20	-0.000925	420	0.001600
40	-0.000735	440	0.000090
60	-0.000595	460	-0.000395
80	-0.000505	480	-0.000455
100	-0.000315	500	-0.000490
120	-0.000175	520	-0.000575
140	-0.000060	540	-0.000685
160	0.000005	560	-0.000895
180	0.000095	580	-0.001105
200	0.000235	600	-0.001565
220	0.000325		
240	0.000515		
260	0.000605		
280	0.000670		
300	0.000760		
320	0.000900		
340	0.001015		
360	0.001080		
380	0.001245		

6. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ๖6 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	-0.000039
-20	-0.000103
-40	-0.000100
-60	-0.000030
-80	-0.000094
-100	0.000042
-120	0.000079
-140	0.000048
-160	0.000018
-180	0.000154
-200	0.000124
-220	0.000093
-240	0.000096
-260	-0.000001
-280	0.000002
-300	-0.000028
-320	-0.000059
-340	-0.000022
-360	-0.000053
-380	-0.000050
-400	-0.000080

7. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ๗7 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0.000466
-20	-0.000121
-40	-0.000109
-60	-0.000096
-80	-0.000059
-100	-0.000071
-120	-0.000058
-140	-0.000021
-160	-0.000083
-180	-0.000021
-200	-0.000008
-220	-0.000021
-240	0.000017
-260	0.000029
-280	0.000042
-300	0.000054
-320	0.000017
-340	0.000079
-360	0.000017
-380	-0.000046
-400	-0.000008

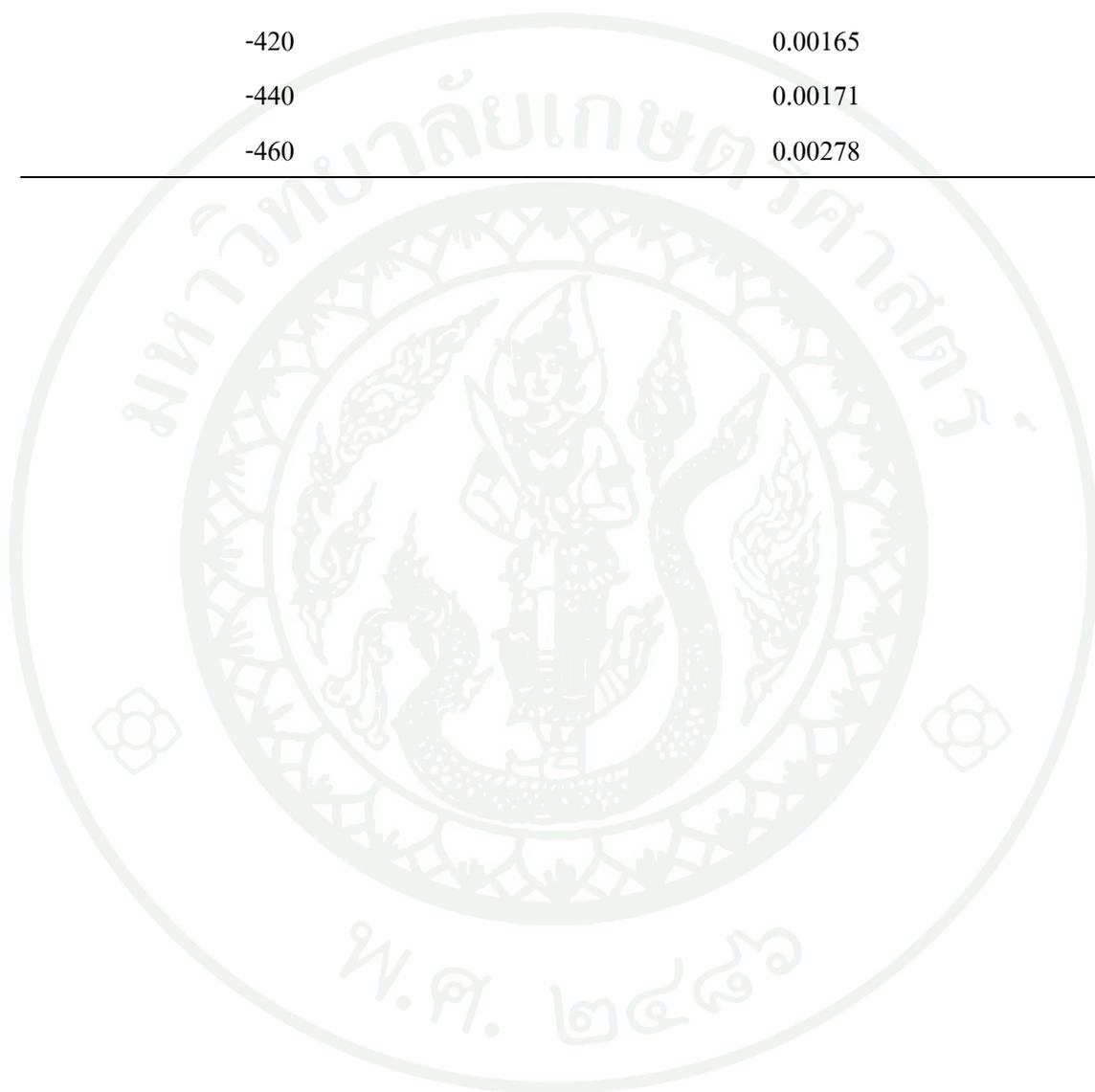
8. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ ๖8 ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0.00300
-20	0.00282
-40	0.00189
-60	0.00095
-80	0.00027
-100	-0.00016
-120	-0.00035
-140	-0.00053
-160	-0.00122
-180	-0.00165
-200	-0.00208
-220	-0.00177
-240	-0.00170
-260	-0.00188
-280	-0.00144
-300	-0.00125
-320	-0.00093
-340	-0.00037
-360	-0.00055

ตารางผนวกที่ จ8 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
-380	0.00002
-400	0.00083
-420	0.00165
-440	0.00171
-460	0.00278



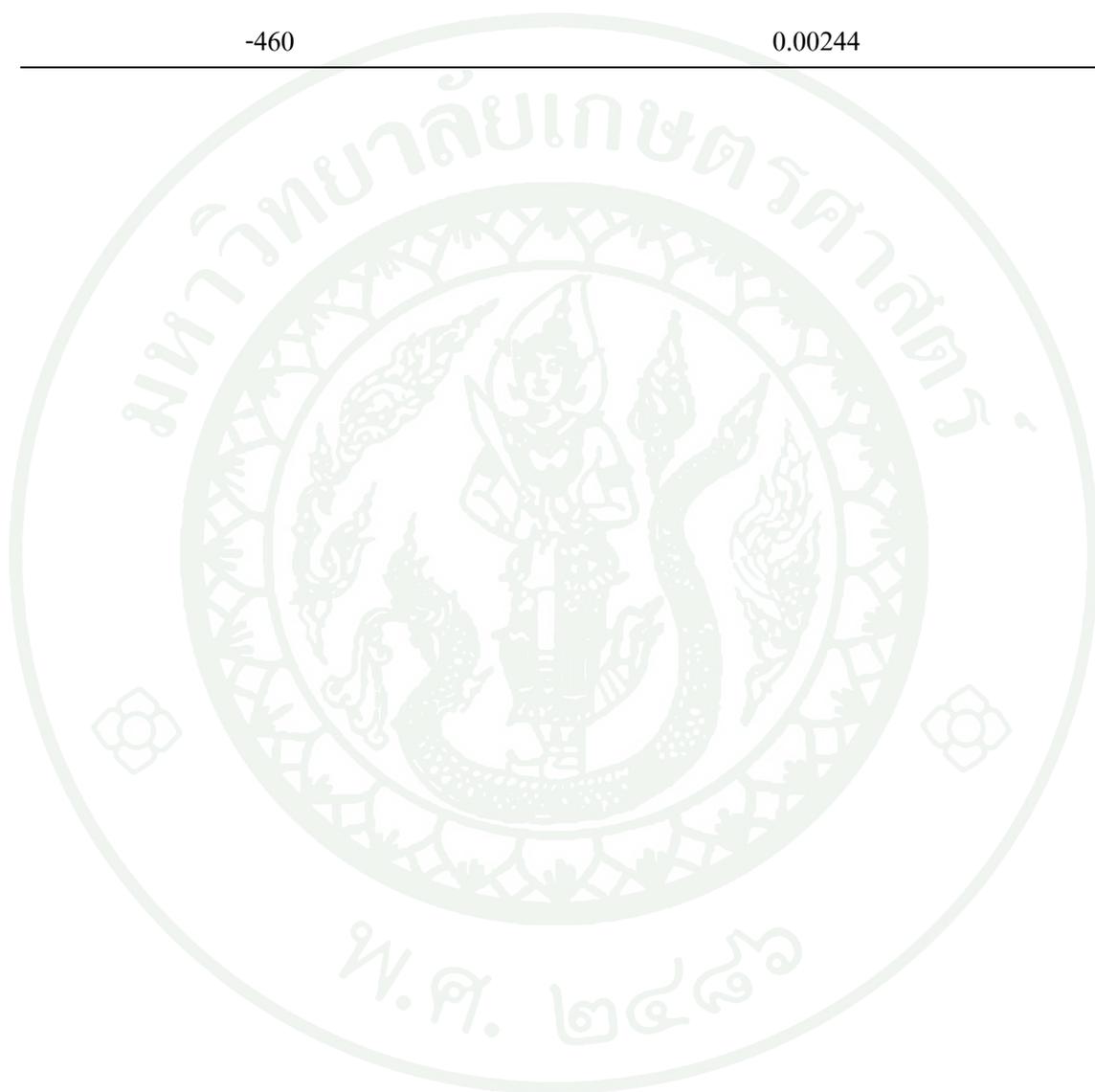
9. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ ๑๑ ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
0	0.00245
-20	0.00121
-40	0.00047
-60	0.00173
-80	0.00099
-100	0.00025
-120	-0.00099
-140	-0.00123
-160	0.00003
-180	0.00029
-200	-0.00145
-220	-0.00118
-240	-0.00142
-260	-0.00166
-280	-0.00140
-300	-0.00114
-320	-0.00088
-340	-0.00012
-360	-0.00036
-380	-0.00060
-400	-0.00034

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าองค์ประกอบความผิดพลาด
-420	0.00142
-440	0.00218
-460	0.00244





ภาคผนวก ข

การหาค่าความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসনศาสตร์ย้อนกลับ
เทียบกับการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์

**การหาค่าความแม่นยำขององค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ
เทียบกับการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์**

1. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

**ตารางผนวกที่ ข1 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่
ในแนวแกน X**

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
0	0	0	0.0000	0.0000
20	-0.013	0.000	-0.0126	0.0002
40	-0.014	0.000	-0.0134	0.0002
60	-0.015	-0.001	-0.0145	0.0002
80	-0.017	-0.001	-0.0154	0.0002
100	-0.017	-0.002	-0.0149	0.0002
120	-0.019	-0.003	-0.0158	0.0002
140	-0.021	-0.004	-0.0163	0.0003
160	-0.021	-0.006	-0.0154	0.0002
180	-0.021	-0.007	-0.0143	0.0002
200	-0.021	-0.009	-0.0125	0.0002
220	-0.023	-0.011	-0.0121	0.0001
240	-0.023	-0.013	-0.0099	0.0001
260	-0.025	-0.015	-0.0095	0.0001
280	-0.025	-0.017	-0.0075	0.0001
300	-0.027	-0.020	-0.0069	0.0000

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความ	องค์ประกอบความ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
	ผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	ผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ		
320	-0.026	-0.023	-0.0036	0.0000
340	-0.027	-0.026	-0.0015	0.0000
360	-0.028	-0.029	0.0008	0.0000
380	-0.029	-0.032	0.0030	0.0000
400	-0.030	-0.036	0.0058	0.0000
420	-0.032	-0.039	0.0078	0.0001
440	-0.033	-0.043	0.0101	0.0001
460	-0.033	-0.047	0.0138	0.0002
480	-0.034	-0.051	0.0171	0.0003
500	-0.036	-0.056	0.0202	0.0004
520	-0.036	-0.060	0.0242	0.0006
540	-0.037	-0.065	0.0277	0.0008
560	-0.039	-0.070	0.0308	0.0009
580	-0.039	-0.075	0.0358	0.0013
600	-0.040	-0.080	0.0403	0.0016
620	-0.041	-0.086	0.0445	0.0020
640	-0.043	-0.091	0.0482	0.0023
660	-0.045	-0.097	0.0520	0.0027
680	-0.047	-0.103	0.0566	0.0032
700	-0.048	-0.109	0.0618	0.0038
720	-0.048	-0.116	0.0674	0.0045

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วย	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসংস্কর্ত	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
	เลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	ย้อนกลับ		
740	-0.049	-0.122	0.0729	0.0053
760	-0.050	-0.129	0.0785	0.0062
780	-0.052	-0.136	0.0835	0.0070
800	-0.053	-0.143	0.0900	0.0081
820	-0.054	-0.150	0.0965	0.0093
840	-0.056	-0.157	0.1019	0.0104
860	-0.056	-0.165	0.1089	0.0119
880	-0.057	-0.173	0.1156	0.0134
900	-0.059	-0.181	0.1218	0.0148
920	-0.059	-0.189	0.1301	0.0169
940	-0.060	-0.197	0.1372	0.0188
960	-0.060	-0.206	0.1455	0.0212
980	-0.061	-0.214	0.1535	0.0236
1000	-0.062	-0.223	0.1616	0.0261
			รวม	0.2203
			MSE	0.0043
			RMSE	0.0657

2. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ข2 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่
ในแนวแกน Y

ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการวัดด้วย เลเซอร์อินเตอร์ฟีโร มิเตอร์	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการ วิเคราะห์จลนศาสตร์ ย้อนกลับ	ความคลาด เคลื่อน	ความคลาด เคลื่อน กำลังสอง
0	0	0	0.0000	0.000000
-20	0.013	0.000	0.0126	0.000158
-40	0.014	0.000	0.0143	0.000203
-60	0.015	0.000	0.0145	0.000211
-80	0.015	0.000	0.0148	0.000218
-100	0.017	0.001	0.0158	0.000249
-120	0.017	0.001	0.0158	0.000249
-140	0.017	0.001	0.0160	0.000258
-160	0.018	0.002	0.0163	0.000265
-180	0.018	0.002	0.0159	0.000253
-200	0.019	0.003	0.0160	0.000256
-220	0.020	0.004	0.0166	0.000274
-240	0.020	0.004	0.0161	0.000260
-260	0.021	0.005	0.0156	0.000245
-280	0.021	0.006	0.0152	0.000232
-300	0.021	0.007	0.0144	0.000208
-320	0.021	0.008	0.0136	0.000186
-340	0.022	0.009	0.0136	0.000185

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วย	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
	เลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	ย้อนกลับ		
-360	0.021	0.010	0.0117	0.000138
-380	0.022	0.011	0.0116	0.000135
-400	0.022	0.012	0.0106	0.000112
-420	0.022	0.013	0.0089	0.000079
-440	0.022	0.014	0.0072	0.000052
-460	0.022	0.016	0.0068	0.000046
-480	0.023	0.017	0.0062	0.000038
			รวม	0.0045
			MSE	0.0002
			RMSE	0.0134

3. ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ ข3 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่
ในแนวแกน Z

ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการ วัดด้วยเลเซอร์ อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบ ความผิดพลาด โดยการวิเคราะห์ จลนศาสตร์ ย้อนกลับ	ความคลาด เคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลัง สอง
0	0.000	0.000	0.0000	0.00000
-20	-0.007	0.000	-0.0067	0.00004
-40	-0.004	-0.001	-0.0032	0.00001
-60	-0.004	-0.001	-0.0027	0.00001
-80	-0.006	-0.002	-0.0041	0.00002
-100	-0.005	-0.003	-0.0016	0.00000
-120	-0.005	-0.005	-0.0006	0.00000
-140	-0.008	-0.007	-0.0011	0.00000
-160	-0.006	-0.009	0.0027	0.00001
-180	-0.007	-0.011	0.0041	0.00002
-200	-0.009	-0.013	0.0047	0.00002
-220	-0.007	-0.016	0.0092	0.00008
-240	-0.010	-0.019	0.0095	0.00009
-260	-0.013	-0.023	0.0099	0.00010
-280	-0.011	-0.026	0.0149	0.00022
-300	-0.013	-0.030	0.0171	0.00029
-320	-0.016	-0.034	0.0179	0.00032
-340	-0.015	-0.039	0.0236	0.00056

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ตำแหน่ง การ เคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการ วัดด้วยเลเซอร์ อินเตอร์เฟอริมิเตอร์	องค์ประกอบ ความผิดพลาด โดยการวิเคราะห์ จลนศาสตร์ ย้อนกลับ	ความคลาด เคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลัง สอง
-360	-0.017	-0.043	0.0262	0.00069
-380	-0.019	-0.048	0.0288	0.00083
-400	-0.018	-0.053	0.0350	0.00123
-420	-0.021	-0.059	0.0382	0.00146
-440	-0.023	-0.064	0.0412	0.00170
-460	-0.021	-0.070	0.0494	0.00244
-480	-0.022	-0.077	0.0544	0.00295
			รวม	0.0131
			MSE	0.0005
			RMSE	0.0229

4. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ ข4 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
0	-0.000053	-0.014298	0.014245	0.000203
20	-0.000158	-0.011438	0.011280	0.000127
40	-0.000103	-0.008776	0.008673	0.000075
60	-0.000027	-0.006311	0.006284	0.000039
80	0.000008	-0.004043	0.004051	0.000016
100	0.000103	-0.001972	0.002076	0.000004
120	0.000059	-0.000099	0.000157	0.000000
140	0.000074	0.001578	-0.001504	0.000002
160	-0.000011	0.003057	-0.003067	0.000009
180	0.000005	0.004339	-0.004334	0.000019
200	0.000060	0.005423	-0.005363	0.000029
220	0.000115	0.006311	-0.006195	0.000038
240	0.000091	0.007001	-0.006910	0.000048
260	0.000026	0.007494	-0.007468	0.000056
280	0.000021	0.007790	-0.007768	0.000060
300	-0.000043	0.007888	-0.007932	0.000063
320	-0.000028	0.007790	-0.007818	0.000061
340	-0.000013	0.007494	-0.007507	0.000056
360	-0.000037	0.007001	-0.007038	0.000050

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসন্ত্র	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
380	-0.000042	0.006311	-0.006353	0.000040
400	-0.000007	0.005423	-0.005430	0.000029
420	0.000049	0.004339	-0.004290	0.000018
440	0.000004	0.003057	-0.003053	0.000009
460	-0.000041	0.001578	-0.001618	0.000003
480	0.000015	-0.000099	0.000113	0.000000
500	0.000030	-0.001972	0.002002	0.000004
520	-0.000015	-0.004043	0.004028	0.000016
540	0.000041	-0.006311	0.006352	0.000040
560	-0.000084	-0.008776	0.008692	0.000076
580	0.000031	-0.011438	0.011470	0.000132
600	-0.000073	-0.014298	0.014225	0.000202
			รวม	0.0015
			MSE	0.000049
			RMSE	0.0070

5. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตารางผนวกที่ ข5 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
0	-0.00102	-0.05040	0.049381	0.002439
20	-0.00093	-0.04032	0.039392	0.001552
40	-0.00074	-0.03093	0.030198	0.000912
60	-0.00060	-0.02224	0.021649	0.000469
80	-0.00051	-0.01425	0.013745	0.000189
100	-0.00032	-0.00695	0.006636	0.000044
120	-0.00018	-0.00035	0.000172	0.000000
140	-0.00006	0.00556	-0.005621	0.000032
160	0.00000	0.01077	-0.010770	0.000116
180	0.00009	0.01529	-0.015198	0.000231
200	0.00023	0.01912	-0.018881	0.000357
220	0.00032	0.02224	-0.021919	0.000480
240	0.00051	0.02468	-0.024162	0.000584
260	0.00060	0.02641	-0.025810	0.000666
280	0.00067	0.02746	-0.026788	0.000718
300	0.00076	0.02781	-0.027045	0.000731
320	0.00090	0.02746	-0.026558	0.000705
340	0.00101	0.02641	-0.025400	0.000645

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วย	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসংস্কৃত	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
	เลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	ย้อนกลับ		
360	0.00108	0.02468	-0.023597	0.000557
380	0.00124	0.02224	-0.020999	0.000441
400	0.00136	0.01912	-0.017756	0.000315
420	0.00160	0.01529	-0.013693	0.000188
440	0.00009	0.01077	-0.010685	0.000114
460	-0.00040	0.00556	-0.005956	0.000035
480	-0.00046	-0.00035	-0.000108	0.000000
500	-0.00049	-0.00695	0.006461	0.000042
520	-0.00058	-0.01425	0.013675	0.000187
540	-0.00069	-0.02224	0.021559	0.000465
560	-0.00090	-0.03093	0.030038	0.000902
580	-0.00111	-0.04032	0.039212	0.001538
600	-0.00157	-0.05040	0.048831	0.002384
			รวม	0.0180
			MSE	0.000582
			RMSE	0.0241

6. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ข6 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X
เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตำแหน่งการ เคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการวัดด้วย เลเซอร์อินเตอร์ฟีโร มิเตอร์	องค์ประกอบความ ผิดพลาดโดยการ วิเคราะห์จลนศาสตร์ ย้อนกลับ	ความคลาด เคลื่อน	ความคลาด เคลื่อนกำลัง สอง
0	-0.000039	-0.01150032	0.011461	0.000131
-20	-0.000103	-0.008050224	0.007948	0.000063
-40	-0.000100	-0.004963296	0.004864	0.000024
-60	-0.000030	-0.002239536	0.002209	0.000005
-80	-0.000094	0.000121056	-0.000215	0.000000
-100	0.000042	0.00211848	-0.002076	0.000004
-120	0.000079	0.003752736	-0.003674	0.000013
-140	0.000048	0.005023824	-0.004976	0.000025
-160	0.000018	0.005931744	-0.005914	0.000035
-180	0.000154	0.006476496	-0.006322	0.000040
-200	0.000124	0.00665808	-0.006534	0.000043
-220	0.000093	0.006476496	-0.006383	0.000041
-240	0.000096	0.005931744	-0.005835	0.000034
-260	-0.000001	0.005023824	-0.005025	0.000025
-280	0.000002	0.003752736	-0.003750	0.000014
-300	-0.000028	0.00211848	-0.002147	0.000005
-320	-0.000059	0.000121056	-0.000180	0.000000
-340	-0.000022	-0.002239536	0.002217	0.000005

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসন্ত্রวิทยา	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
-360	-0.000053	-0.004963296	0.004911	0.000024
-380	-0.000050	-0.008050224	0.008001	0.000064
-400	-0.000080	-0.01150032	0.011420	0.000130
			รวม	0.0007
			MSE	0.000035
			RMSE	0.0059

7. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตารางผนวกที่ ข7 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Z เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
0	0.000466	-0.008911	0.009378	0.000088
-20	-0.000121	-0.006238	0.006117	0.000037
-40	-0.000109	-0.003846	0.003737	0.000014
-60	-0.000096	-0.001735	0.001639	0.000003
-80	-0.000059	0.000094	-0.000152	0.000000
-100	-0.000071	0.001642	-0.001713	0.000003
-120	-0.000058	0.002908	-0.002966	0.000009
-140	-0.000021	0.003893	-0.003914	0.000015
-160	-0.000083	0.004596	-0.004680	0.000022
-180	-0.000021	0.005019	-0.005039	0.000025
-200	-0.000008	0.005159	-0.005168	0.000027
-220	-0.000021	0.005019	-0.005039	0.000025
-240	0.000017	0.004596	-0.004580	0.000021
-260	0.000029	0.003893	-0.003864	0.000015
-280	0.000042	0.002908	-0.002866	0.000008
-300	0.000054	0.001642	-0.001587	0.000003
-320	0.000017	0.000094	-0.000077	0.000000
-340	0.000079	-0.001735	0.001815	0.000003
-360	0.000017	-0.003846	0.003863	0.000015

ตารางผนวกที่ ข7 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসন্ত্র য়োনกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
-380	-0.000046	-0.006238	0.006192	0.000038
-400	-0.000008	-0.008911	0.008903	0.000079
			รวม	0.0005
			MSE	0.000021
			RMSE	0.0046

8. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ ข8 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน X เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วย	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
	เลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	ย้อนกลับ		
0	0.00300	-0.03716	0.04017	0.00161
-20	0.00282	-0.02747	0.03029	0.00092
-40	0.00189	-0.01866	0.02054	0.00042
-60	0.00095	-0.01072	0.01168	0.00014
-80	0.00027	-0.00367	0.00394	0.00002
-100	-0.00016	0.00250	-0.00266	0.00001
-120	-0.00035	0.00779	-0.00813	0.00007
-140	-0.00053	0.01219	-0.01272	0.00016
-160	-0.00122	0.01572	-0.01693	0.00029
-180	-0.00165	0.01836	-0.02001	0.00040
-200	-0.00208	0.02012	-0.02221	0.00049
-220	-0.00177	0.02101	-0.02277	0.00052
-240	-0.00170	0.02101	-0.02271	0.00052
-260	-0.00188	0.02012	-0.02201	0.00048
-280	-0.00144	0.01836	-0.01980	0.00039
-300	-0.00125	0.01572	-0.01697	0.00029
-320	-0.00093	0.01219	-0.01313	0.00017
-340	-0.00037	0.00779	-0.00815	0.00007

ตารางผนวกที่ ๗ (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসন্ত্র	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
-360	-0.00055	0.00250	-0.00305	0.00001
-380	0.00002	-0.00367	0.00369	0.00001
-400	0.00083	-0.01072	0.01156	0.00013
-420	0.00165	-0.01866	0.02030	0.00041
-440	0.00171	-0.02747	0.02918	0.00085
-460	0.00278	-0.03716	0.03995	0.00160
			รวม	0.00997
			MSE	0.00042
			RMSE	0.02039

9. ความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตารางผนวกที่ ข9 การหาค่าความแม่นยำของความผิดพลาดเนื่องจากความตรงในทิศของแกน Y เมื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
0	0.00245	0.01276	-0.01031	0.00011
-20	0.00121	0.00943	-0.00822	0.00007
-40	0.00047	0.00641	-0.00593	0.00004
-60	0.00173	0.00368	-0.00195	0.00000
-80	0.00099	0.00126	-0.00027	0.00000
-100	0.00025	-0.00086	0.00111	0.00000
-120	-0.00099	-0.00267	0.00169	0.00000
-140	-0.00123	-0.00419	0.00296	0.00001
-160	0.00003	-0.00540	0.00543	0.00003
-180	0.00029	-0.00630	0.00660	0.00004
-200	-0.00145	-0.00691	0.00546	0.00003
-220	-0.00118	-0.00721	0.00603	0.00004
-240	-0.00142	-0.00721	0.00579	0.00003
-260	-0.00166	-0.00691	0.00525	0.00003
-280	-0.00140	-0.00630	0.00490	0.00002
-300	-0.00114	-0.00540	0.00425	0.00002
-320	-0.00088	-0.00419	0.00330	0.00001
-340	-0.00012	-0.00267	0.00255	0.00001

ตารางผนวกที่ ข9 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ (mm)	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์	องค์ประกอบความผิดพลาดโดยการวิเคราะห์জনসন্ত্র য়োনกลับ	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
-360	-0.00036	-0.00086	0.00050	0.00000
-380	-0.00060	0.00126	-0.00186	0.00000
-400	-0.00034	0.00368	-0.00402	0.00002
-420	0.00142	0.00641	-0.00499	0.00002
-440	0.00218	0.00943	-0.00725	0.00005
-460	0.00244	0.01276	-0.01032	0.00011
			รวม	0.00069
			MSE	0.000029
			RMSE	0.005360

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายพรชัย ศรีพัชรารุท
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 15 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยบูรพา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี