

ผลกระทบของตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องวัดแวนดิงต่อค่าพิกัดความเื้อของรูปทรง
ชิ้นงาน

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2555

THE EFFECT OF ERROR PARAMETERS OF VERTICAL MACHINING CENTER ON
GEOMETRIC DIMENSIONING AND TOLERANCE OF MACHINED PART

Pimpet Sratong-On



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2012

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องกัด

แนวตั้งต่อค่าพิกัดความเฝือของรูปทรงชิ้นงาน

โดย

พิมพ์เพชร สระทองอ่อน

สาขา

วิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. จิตะพล หุยะนันท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย)

.....กรรมการ

(ดร. พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล)

พิมพ์เพชร สระทองอ่อน : ผลกระทบของตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องกัดแนวตั้ง
ต่อค่าพิกัดความเผื่อรูปทรงของชิ้นงาน. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล, 72 หน้า.

คุณภาพและขนาดที่ถูกต้องของชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร
อาทิเช่น ความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วนในระบบรางเลื่อนและโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของเครื่องจักร
เนื่องจากอุณหภูมิ ปัจจุบันนิยมวิธีการตรวจสอบความเที่ยงตรงและความถูกต้องของเครื่องจักร
ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 มาตรฐานด้วยกัน คือ ISO-10791 จะทำการตัดขึ้นรูปชิ้นงาน และ
ตรวจวัดรูปทรงด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน (CMM) และอีกมาตรฐานหนึ่ง คือ ISO-230 จะ
ทำการวัดตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรจำนวน 21 ตัวแปร ด้วยชุดเครื่องมือ Laser
Interferometer System (LIS) ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาแนวทางการตรวจสอบความถูกต้องของ
เครื่องจักรที่สะดวก รวดเร็ว ใช้ต้นทุนต่ำ มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ ในระดับที่ยอมรับ
ได้ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Straightness ของชิ้นงานที่ถูกกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด
แนวตั้งรุ่น Makino S33 ตามกระบวนการ ISO-10791 และตำแหน่งทางเดินของมีดกัดที่
คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการแทนค่าตัวแปรความผิดพลาดจากกระบวนการ
ISO-230

จากผลการวิจัยพบว่า การทำนายผลการวัด Straightness ด้วย CMM ในแนวแกน X
โดยใช้สมการพหุนามกำลัง 3 ที่สร้างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ มีค่า $R^2 = 0.84$ และใน
แนวแกน Y เลือกใช้ฟังก์ชันเส้นเหมือนพหุนาม (Spline) มีค่า $R^2 = 0.35$ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า
ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดมีผลต่อค่า Straightness ของชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ที่
ระดับความเชื่อมั่น 90% ทั้งนี้จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าสาเหตุอื่นๆที่ทำให้ไม่สามารถสร้าง
สมการแนวโน้มให้สมบูรณ์เพื่อทำนายผลลัพธ์ของชิ้นงานได้นั้น อาจมาจากความผิดพลาดที่
เกิดจากการหมุนของ Spindle

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PIMPET SRATONG-ON : THE EFFECT OF ERROR PARAMETERS OF
VERTICAL MILLING MACHINE ON GD&T OF MACHINED PART. ADVISOR :
ASSISTANCE DR. LERKIAT VONGSARNPIGOON, 72 PP.

Quality and dimensional accuracy of machined parts are independent on machine tool errors e.g. the structure of guideway and thermal stress caused the positional errors of machine. There are 2 main standards for inspection machine precision and accuracy. ISO-10791, machining center test condition, is conducted by measurement the geometry of machined part by Coordinate Measuring Machine (CMM). ISO-230, test code for machine tools, is conducted by Laser Interferometer System, LIS, to measure 21 geometric machine error parameters. This research studied the methodology for inspection machine which not only uses low operating cost and fast but also reliable and acceptable. Then, the coefficient of determination (R^2) was determined in order to study the correlation between positional error from ISO-230 and machined part according to ISO-10791. VMC Makino S33 was used as a case study in this study.

It was found that straightness error of standard part measured by CMM can be predicted by the 3rd degree polynomial trend line fitted from mathematical model in X-axis ($R^2 = 0.84$). Cubic spline interpolation was used as trend line in Y-axis to predict straightness error from CMM and it has $R^2 = 0.36$. Therefore, it can be concluded that the positional machine error have an effect on straightness of machined part at 0.01 significant level. Moreover, some literatures reported that the other factors e.g. spindle error motions which are not included in mathematical model causes imperfect of trend line.

Graduate School
Field of Engineering Technology
Academic Year 2012

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอเกียรติ วงศ์สารพิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย ซึ่งเป็นผู้ริเริ่มโครงการวิจัย ทั้งยังกรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่านมาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนวิธีการใช้เครื่องมือวัดต่างๆ มาโดยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วิโรจน์ ทศนะ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำแนวทางการสั่งซื้ออุปกรณ์ทำวิจัยและความรู้เรื่องการใช้เครื่องจักรในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology Thailand : NIMT) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทำวิจัย รวมถึงการจัดการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจสอบเครื่องจักร ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการทำงานวิจัยนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
 บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	5
2.2 ประเภทของความผิดพลาดของเครื่องจักร.....	6
2.3 ตัวแปรความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร.....	7
2.4 การคำนวณตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่เกิดการเลื่อนและการหมุน โดยใช้ เมตริกซ์จัตุรัสและเมตริกซ์เอกพันธ์.....	8
2.5 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการเลื่อน.....	8
2.6 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการหมุน.....	10
2.7 หลักการทำงานของ Michelson Interferometer.....	13
2.8 หลักการทำงานของเครื่องวัดเลเซอร์ Renishaw ML10.....	14
2.9 การคำนวณและการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรด้วยชุดเครื่องมือ LIS.....	15
2.10 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Analysis).....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	22
3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33.....	22
3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด.....	28
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	33
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4.1 ค่าความตรง (Straightness) ของเครื่องจักรในแนวแกน X.....	38
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองในแนวแกน X.....	40
4.3 ค่าความตรง (Straightness) ของเครื่องจักรในแนวแกน Y.....	42
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองในแนวแกน Y.....	44
5 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก. การดำเนินงานตามมาตรฐาน ISO-10791.....	55
ภาคผนวก ข. เงื่อนไข สภาพแวดล้อม และข้อกำหนดในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230.....	62
ภาคผนวก ค. ค่าคงที่ของเครื่องกัดแนวตั้ง Makino S33.....	66
อภิธานศัพท์.....	71
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	72

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน.....	4
2.1 แสดงจำนวนตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ 3 แกน.....	8
4.1 แสดงข้อมูลจากการวัดด้วย CMM ตามแนวแกน X.....	38
4.2 แสดงข้อมูลดิบจากการวัด CMM ตามแนวแกน Y.....	42
5.1 สรุปชนิดสมการแนวโน้มจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	47
ก-1 แสดงประเภท, ขนาด และมาตรฐานที่กำหนดในการทดสอบชิ้นงาน	56



สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 ผังการดำเนินงาน	2
2.1 ตัวแปรความผิดพลาดเมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามแกน X.....	7
2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง O_m ไปยังกรอบอ้างอิง O_c	9
2.3 แสดงกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$	11
2.4 ภาพ 3 และ 2 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ก) ภาพ 3 มิติ ของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ_x และ ข): มุมมอง 2 มิติ ของภาพด้านซ้ายมือ	11
2.5 หลักการทำงานของ Michelson Interferometer	13
2.6 การแทรกสอดของคลื่นแสงอ้างอิงกับคลื่นแสงที่สะท้อนจากกระจกที่เคลื่อนที่	14
2.7 ระบบการวัดโดยชุดเครื่องมือ LIS (Laser Interferometer System)	14
2.8 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector เพื่อทำการวัดแนวตรง.....	16
2.9 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector ในการวัดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากมุม	17
2.10 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรเนื่องจาก มุมบนตัวเครื่องจักร	18
2.11 ความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางเดียวกัน ก) สัมพันธ์ระดับสูง, ข) สัมพันธ์ระดับปาน กลางและ ค) ไม่มีความสัมพันธ์กัน	19
2.12 ความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางตรงกันข้าม	20
3.1 แบบจำลองและระบบพิกัดของเครื่องจักร CNC Makino S33.....	22
3.2 การกำหนด Coordinate Frame ของเครื่องจักร CNC Makino S33.....	23
3.3 หน้าโปรแกรม V-CNC ในส่วนของ Machining Center.....	29
3.4 ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm	30
3.5 ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm	30
3.6 ดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm.....	31
3.7 เครื่อง CMM Mitutoyo รุ่น Crysta Apex C 7106.....	31
3.8 ชุดเครื่องมือ LIS ของ Renishaw รุ่น ML 10.....	32
3.9 ชิ้นงานมาตรฐานที่ขึ้นรูปโดยสมบูรณ์.....	33
3.10 ดำเนินการวัด Straightness ในแนวแกน X ด้วย CMM.....	33
3.11 ดำเนินการวัด Straightness ในแนวแกน Y ด้วย CMM.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.12 หน้าโปรแกรมควบคุมทิศทางการวัดของ CMM.....	35
3.13 อุปกรณ์กำเนิดแสงเลเซอร์.....	36
3.14 ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลของ LIS	36
3.15 Beam splitter และ Retroreflector	37
4.1 แผนภาพการกระจายของจุดพิกัดในแนวแกน Y จากการวัด Striaghtness ในแนวแกน X.....	39
4.2 ค่า Striaghtness ของแกน X ที่ได้จากการวัด CMM.....	39
4.3 แผนภาพการกระจายของตำแหน่งที่ผิดพลาดในแนวแกน Y ของเครื่องจักร	40
4.4 ค่า Striaghtness ของแกน X ที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์	40
4.5 เปรียบเทียบสมการแนวโน้มพหุนามกำลัง 3, ค่า Striaghtness จาก CMM และ แบบจำลองคณิตศาสตร์	41
4.6 สมการแนวโน้มพหุนามกำลัง 3 กับค่า Striaghtness จาก CMM.....	41
4.7 แผนภาพการกระจายของจุดพิกัดในแนวแกน X จากการวัด Striaghtness ในแนวแกน Y.....	43
4.8 ค่าความตรง (Striaghtness) ของแกน Y ที่ได้จากการวัด CMM.....	43
4.9 แผนภาพการกระจายของตำแหน่งที่ผิดพลาดในแนวแกน Y ของเครื่องจักร	44
4.10 ค่าความตรง (Striaghtness) ของแกน Y ที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	44
4.11 การประมาณค่าโดยใช้ฟังก์ชันเส้นเหมือนพหุนาม (Spline), ค่า Striaghtness จาก CMM และ แบบจำลองคณิตศาสตร์	45
4.12 ฟังก์ชันเส้นเหมือนพหุนาม (Spline) กับค่า Striaghtness จาก CMM	45
ก-1 มุมมองด้านบนของชิ้นงานมาตรฐาน.....	57
ก-2 ภาพตัดด้าน Z-Z	57
ก- 3 แสดงการก่ขั้้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 140 mm	58
ก-4 แสดงการก่ขั้้นมุมเอียง 3°	59
ก-5 แสดงการก่ขั้้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด.....	60
ก-6 การก่ขั้้นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 mm.....	61
ข-1 ตัวอย่างการวัดค่าความคลาดเคลื่อนแนวตรงของเครื่องจักรที่มีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 2000 mm	65
ค-1 กรอบอ้างอิง O _R และ O _w	67
ค-2 กรอบอ้างอิง O _Z และ O _T	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

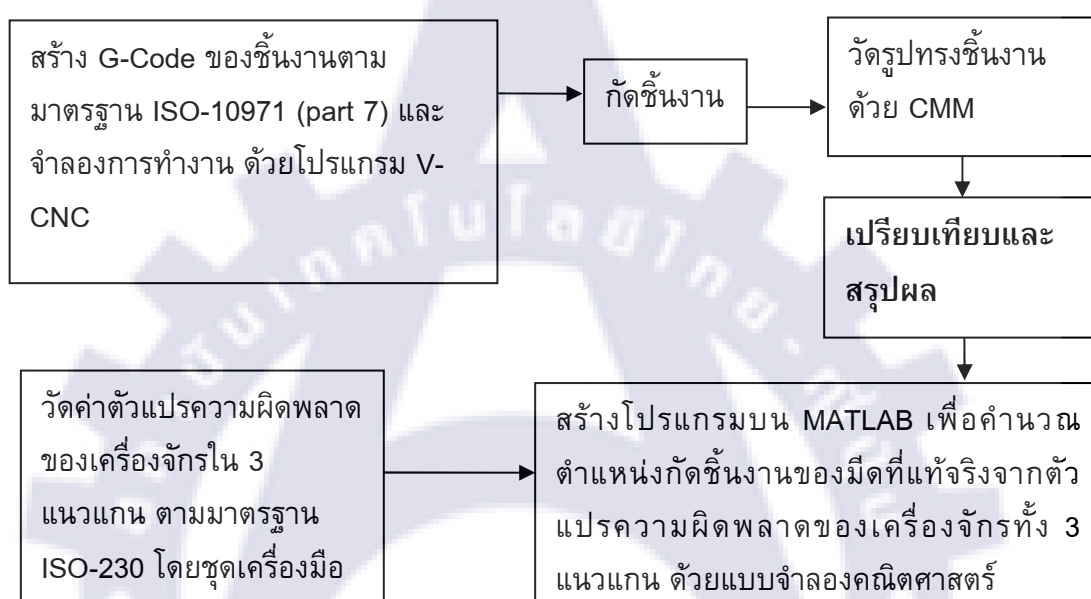
ปัจจุบันเครื่องจักรที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมในกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูป (Machining) ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองจำนวนและคุณภาพของการผลิตชิ้นส่วนที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เครื่องจักรซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมได้ถูกพัฒนาเป็นเครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) เพื่อให้สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนได้โดยอัตโนมัติ และด้วยความถูกต้องในระดับสูง เมื่อชิ้นส่วนมีความถูกต้องตามที่ได้ออกแบบจะทำให้การประกอบเป็นชิ้นงานสำเร็จได้อย่างรวดเร็ว และได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีความทนทานสูง ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ เครื่องจักร CNC ที่ใช้ผลิตจะต้องสามารถรักษาความเที่ยงตรง (Precision) และความถูกต้อง (Accuracy) ที่ดีอยู่ตลอดเวลา

ในการทำการผลิต การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นหรือ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรง และความถูกต้องของเครื่องจักรเป็นประจำทุกปี เพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรยังคงรักษาสภาพของความถูกต้องในการทำงานอยู่ตลอดเวลา โดยการตรวจสอบส่วนใหญ่จะดำเนินการตามมาตรฐาน 2 มาตรฐาน คือ ISO-230 (Test Code for Machine Tools) และ ISO-10791 (Machining Center Test Condition)

การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230 จะใช้ชุดเครื่องมือ Laser Interferometer System (LIS) ทำการตรวจสอบ ซึ่งจะได้รายละเอียดของความผิดพลาดภายในของเครื่องจักรอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามชุดเครื่องมือ LIS นั้นมีราคาแพง และต้องการผู้เชี่ยวชาญในการใช้ชุดเครื่องมือดังกล่าว จึงเป็นการยากที่ภาคอุตสาหกรรมระดับ SMEs จะสามารถกระทำได้

การทดสอบเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-10791 เป็นวิธีการทดสอบความผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูป โดยพิจารณาที่ความผิดพลาดของรูปทรง หรือที่เรียกว่า Geometric Dimensioning and Tolerance (GD & T) ในการทดสอบนี้ชิ้นงานทดสอบ จะต้องถูกขึ้นรูปโดยเครื่องจักรที่ต้องการตรวจสอบ แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัด 3 แกน (Coordinate Measuring Machine, CMM) จะทำให้ทราบว่าคุณภาพการทำงานของเครื่องจักรทำให้เกิดความผิดพลาดในรูปทรงของชิ้นงานมากน้อยแค่ไหน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าว เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องการผู้เชี่ยวชาญพิเศษ แต่จะไม่สามารถให้รายละเอียดของความผิดพลาดภายในของเครื่องจักรอย่างสมบูรณ์ดังเช่นการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-230

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องจักรที่มีราคาไม่แพง รวดเร็ว โดยให้มีความถูกต้องในการตรวจสอบที่ยอมรับได้ และมีความน่าเชื่อถือเพื่อลดต้นทุนจากการจ้างผู้เชี่ยวชาญพิเศษ โดยทำการศึกษา ความผิดพลาดในรูปทรงของชิ้นงานที่เกิดจากการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ISO-10791 มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรความผิดพลาดในแนวแกนต่างๆของเครื่องจักรที่ทำการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-230 อย่างไร ซึ่งเครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือ เครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33 ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น และมีการดำเนินการงานการวิจัยดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังการดำเนินงาน

จากรูปที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งการทดสอบความผิดพลาดของเครื่องจักรตามมาตรฐานทั้งสองมาตรฐานคือ ISO-10791 และ ISO-230 โดยเริ่มจากการกัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 (part 7) ประเภท A จากนั้นทำการตรวจวัดรูปทรงของชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM และเก็บค่าไว้เปรียบเทียบ

ในส่วนของมาตรฐาน ISO-230 จะทำการวัดตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรทั้ง 3 แนวแกน ด้วยชุดเครื่องมือ LIS จากนั้นคำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดโดยอาศัยสมการของการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Kinematics of Rigid Body) แล้วจึงทำการเปรียบเทียบ และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของรูปทรงที่ได้จากวิธีการตามมาตรฐาน ISO-10791

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับความผิดพลาดทางรูปทรงของชิ้นงานว่ามีความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับใด

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

พิจารณาความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ในแนวตรงของเครื่องจักรเนื่องจากตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในแนวแกน X และ Y ตามมาตรฐาน ISO-230 และจากการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบกับความผิดพลาดของรูปทรงในแนวตรง (Straightness) ที่เกิดจากกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูปของเครื่องจักรที่ตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-10791

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้วิธีการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-10791 เพื่อการประมาณค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในการเคลื่อนที่แนวตรงตามมาตรฐาน ISO-230 เนื่องจากการตรวจสอบเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO-10791 นั้นจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ และไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การสอบเทียบ (Calibration) เป็นกระบวนการที่ทำให้เครื่องจักรมีความถูกต้องอยู่ตลอดเวลา โดยทั่วไปแล้วการสอบเทียบต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องสูงกว่าเครื่องจักรที่ต้องการสอบเทียบ ในปัจจุบันใช้ชุด Laser Interferometer System (LIS) เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน ซึ่งให้ผลการตรวจวัดที่มีความถูกต้อง และมีความเที่ยงตรงสูง แต่การตรวจวัดใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีการศึกษาถึงวิธีการสอบเทียบเครื่องจักรในหลายรูปแบบ เพื่อให้สามารถทำการตรวจสอบได้สะดวก รวดเร็วขึ้น และมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

ในช่วงเวลา 10 ปีมานี้ได้มีผู้พัฒนาวิธีการต่างๆ ดังนี้ Okafor และ Ertekin ได้เสนอวิธีการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเชิงเกร็ง และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้เมตริกซ์เอกพันธ์เพื่อคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC, Cincinnati Milacron Sabre 750 อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร (Okafor; and Ertekin. 1999) หลังจากนั้น W. Nerdnoi ได้ทำการเสนอผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาการวัดค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรโดยใช้ Laser Interferometer Tracking System (LITS) ด้วยระบบ Tracking System จะสามารถทำให้ชุดเครื่องวัดเลเซอร์ สามารถตรวจสอบตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรได้หลายแนวแกน (X, Y และ Z) โดยไม่ต้องเสียเวลาในการจัดแนวชุดเครื่องวัดที่ละแนวแกน (Warakom Nerdnoi. 1999)

ต่อมา J.P. Choi ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนา การตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในเครื่องจักร โดยเปลี่ยนจากตรวจสอบด้วยเครื่อง CMM เป็นการวัดขนาดชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังอยู่บนเครื่องจักร (On-Machine measurement : OMM) เปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากเครื่องจักร โดยแบบจำลองค่าความผิดพลาดนั้นสร้างขึ้นจากสมการพหุนาม และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสที่ติดตั้งบนเครื่องจักร โดยการใช้ลูกบาศก์ (Cube Array Artifact) ทั้งหมด 9 ลูกบาศก์ ที่สามารถวัดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสทั้งการเคลื่อนที่ขาไปและกลับ แต่ก่อนที่จะติดตั้ง Artifact บนเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักร จะต้องมีการสอบเทียบ artifact โดยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน ซึ่งผลต่างของค่าตำแหน่งของการวัดทั้งขาไปและขากลับของเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักรกับเครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบ 3 แกนจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่นำไปใส่ในสมการพหุนามเพื่อทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร (Choi; Min; and Lee. 2004)

งานวิจัยของ Chen เสนอวิธีการวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรทั้ง 21 ตัวแปร (รวมตัวแปรของการตั้งฉากซึ่งกันและกันในแนวแกน X, Y และ Z อีก 3 ตัวแปร) โดยใช้เครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer) วัดการกระจัดทั้งหมด 15 เส้นทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไป แล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนทั้ง 21 ตัวแปรของเครื่องจักร 3 แกน ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้องแม่นยำ (Chen; Yuan; and Ni. 2000)

ต่อมา Manukid ได้เสนอวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรอันเนื่องมาจากโครงสร้างและน้ำหนัก โดยใช้วิธีการ Neural Network และในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรนั้น ได้รวมความผิดพลาดที่เกิดจากแรงที่มีผลต่อเครื่องจักร (Raksiri; and Parnichkun. 2004)

หลังจากนั้นในงานวิจัยของ Zhu ได้เสนอการปรับปรุงวิธีการวัดและการชดเชยตัวแปรความผิดพลาดเหล่านี้โดยพัฒนาโปรแกรมที่รวมเอาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร (Geometric Error Model) กับการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC ให้โปรแกรมเข้าไปชดเชยความผิดพลาดที่ G-Code หลังจากนั้นได้ทดลองนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักร CNC 5 แกน (Zhu; et al. 2011)

2.2 ประเภทของความผิดพลาดของเครื่องจักร

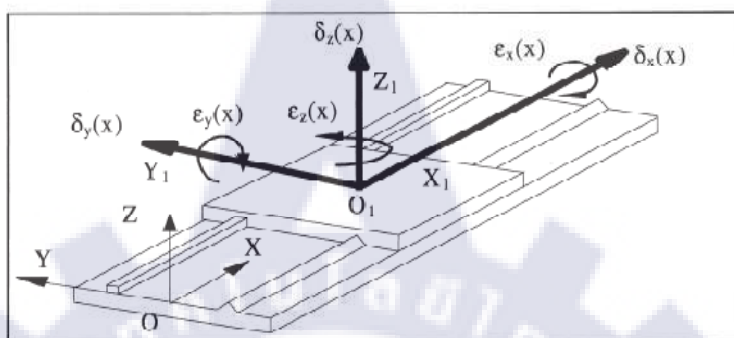
กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความผิดพลาดของเครื่องจักร ได้จำแนกประเภทความผิดพลาดของเครื่องจักรออกเป็น 2 ประเภทคือ (Ferreira; and Liu. 1993)

2.2.1 Quasistatic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยภายในของเครื่องจักรเกิดความผิดพลาด (Geometric Error) หรือเกิดจากความผิดพลาดในการประกอบชิ้นส่วนย่อยดังกล่าว นอกจากนั้นอาจเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนย่อยเมื่อมีการใช้งานเครื่องจักรไประยะเวลาหนึ่ง รวมถึงความผิดพลาดที่เกิดจากน้ำหนักและอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดความเครียดในชิ้นงาน แล้วส่งผลไปทำให้โครงสร้างตัวเครื่องจักรผิดรูปไปจากเดิม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความผิดพลาดประเภทนี้เป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้เครื่องจักรเกิดความผิดพลาดถึงร้อยละ 70

2.2.2 Dynamic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดจากการหมุนของแกนมีด หรือแรงสั่นสะเทือนในโครงสร้างของเครื่องจักร หรือความผิดพลาดในระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

2.3 ตัวแปรความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

ตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเลื่อน (Linear Error Parameters) ซึ่งประกอบไปด้วย Straightness Error และ Scale Error และ ประเภทที่สอง คือ ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการหมุน (Angular Error Parameters) ซึ่งประกอบไปด้วย Roll, Pitch และ Yaw ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวแปรความผิดพลาดเมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามแกน X

ที่มา : A.C. Okafor; and Y.M. Ertekin. (1999, November). **Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center Using Rigid Body Kinematics.** p. 1,200.

โดยให้

δ_x	คือ Scale error ซึ่งจะเกิดขึ้นตามทิศที่เครื่องจักรเคลื่อนที่
δ_y และ δ_z	คือ Straightness error ในแนวระนาบ และแนวตั้งตามลำดับ
ϵ_x	คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน X (Roll)
ϵ_y	คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน Y (Pitch)
ϵ_z	คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน Z (Yaw)

ทั้งหมดนี้เป็นค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ในแกนเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วเครื่องจักรที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีการเคลื่อนที่ทั้งหมดอย่างน้อย 3 แกนด้วยกัน ดังนั้นตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นรวมแล้วจะมีทั้งหมด 18 ตัวแปร นอกจากนี้ยังมีความผิดพลาดของค่าความตั้งฉากระหว่างทั้ง 3 แกน อีก 3 ตัวแปร ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงจำนวนตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ 3 แกน

ชนิดของความผิดพลาด	จำนวนตัวแปร
Scale Error	3
Straightness Error	6
Angular Error	9
Squareness Error	3
รวม	21

2.4 การคำนวณตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่เกิดการเลื่อนและการหมุน โดยใช้เมตริกซ์จัตุรัสและเมตริกซ์เอกพันธ์

เมตริกซ์จัตุรัสนั้นเป็นเมตริกซ์ที่มีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนหลัก และยังง่ายต่อการหาผลคูณและการหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ ในขณะที่เดียวกันเมตริกซ์เอกพันธ์ก็เป็นเมตริกซ์ที่มีคุณสมบัติในการกำหนดตำแหน่งและกรอบ เนื่องจากคุณสมบัติของเมตริกซ์เอกพันธ์คือจำนวนสมาชิกที่อยู่ในเมตริกซ์นั้นจะต้องเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยและตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นถ้าต้องการจะกำหนดพิกัดและตำแหน่งอ้างอิงด้วยเมตริกซ์จัตุรัสที่เป็นเมตริกซ์เอกพันธ์ควรจะกำหนดดังตัวอย่างในสมการที่ (2.1) (Kay, 2005)

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} U_x & W_x & V_x & P_x \\ U_y & W_y & V_y & P_y \\ U_z & W_z & V_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

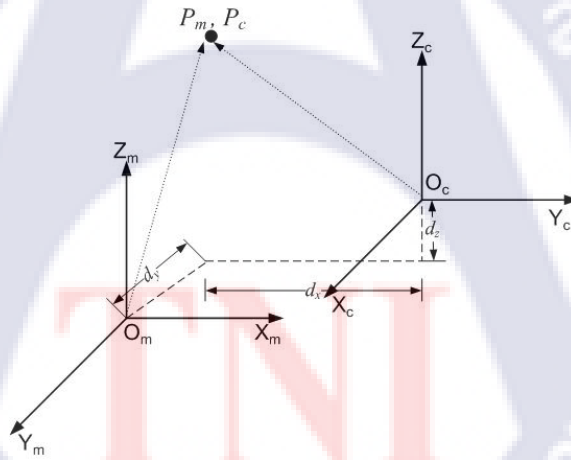
โดย w คือ Weighting Factor ใช้ในกรณีที่มองภาพเป็นสามมิติเสมือนจริงหรือ (Perspective View) ซึ่งค่า w จะมีค่ามากเมื่อมองในมุมมองระยะใกล้ และมีค่าน้อยเมื่อมองจากระยะไกล

2.5 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการเลื่อน

การเลื่อน (Translation) เป็นการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ในทิศทางของวัตถุที่เคลื่อนที่โดยไม่มีการหมุนเกิดขึ้น โดยจะสามารถหาตำแหน่งของกรอบที่เลื่อนที่ไปเทียบกับกรอบอ้างอิงได้ โดยการบวกหรือลบเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่กรอบได้เคลื่อนที่ไป ตัวอย่างเช่น กรอบอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0, 0)$ จากนั้นเลื่อนกรอบอ้างอิงไปที่ตำแหน่ง (d_x, d_y, d_z) ดังนั้นเมตริกซ์การเลื่อนตำแหน่งที่เป็นทั้งเมตริกซ์เอกพันธ์ และเมตริกซ์จัตุรัสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

โดยค่า d_x , d_y และ d_z เป็นค่าการเลื่อนในแกน X , Y และ Z ตามลำดับ จากสมการที่ (2.2) จะสังเกตเห็นได้ว่า สมาชิกในแถวที่ 1 หลัก 2 และ 3, สมาชิกในแถวที่ 2 หลัก 1 และ 3 และสมาชิกในแถวที่ 3 หลัก 1 และ 2 มีค่าเป็นศูนย์ นั้นแสดงถึงการเคลื่อนที่นั้นเกิดเฉพาะ การเลื่อนตำแหน่งและไม่เกิดการหมุน ดังนั้นในกรณีที่ยากทราบว่าตำแหน่งที่กรอบอ้างอิง เลื่อนไปมีค่าเป็นเท่าใดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม ทำได้โดยการเอาเมตริกซ์บอกการเลื่อน ตำแหน่งไปคูณกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม ผลที่ได้จากการคูณนั้นก็จะเป็นตำแหน่งของกรอบอ้างอิง ใหม่ ยกตัวอย่างเช่น จุด P_m ที่อยู่ในกรอบอ้างอิง O_m มีพิกัด (1, 2, 3) และกรอบอ้างอิง O_c เลื่อนจากกรอบอ้างอิง O_m ไปในทางแกน X เป็นระยะ d_x หน่วย เลื่อนไปทางแกน Y เป็น d_y หน่วย และเลื่อนไปทางแกน Z เป็น d_z หน่วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง O_m ไปยังกรอบอ้างอิง O_c

จากรูปที่ 2.2 จะสามารถเขียนเมตริกซ์การเลื่อนได้เป็น

$$\tilde{T}_c^m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

และสามารถเขียนเมตริกซ์ที่ระบุตำแหน่งของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง O_m ในระบบพิกัด X, Y และ Z คือ

$$\hat{P}_m = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ดังนั้นจุด P_c บนกรอบอ้างอิง O_c จะสามารถคำนวณได้โดยนำสมการที่ (2.3) คูณกับสมการที่ (2.4) จะเป็นดังสมการที่ (2.5)

$$\hat{P}_c = \tilde{T}_c^m \hat{P}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+d_x \\ 2+d_y \\ 3+d_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

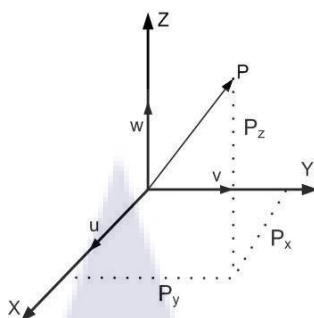
โดยสัญลักษณ์ $\tilde{T}_c^m$ เป็นการบอกว่าเมตริกซ์นี้คือเมตริกซ์ที่บอกตำแหน่งการเลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง O_c เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง O_m

ในกรณีที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X ดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้ δ_x คือ Scale Error และ δ_y และ δ_z คือ Straightness Error ในทิศทางแกน Y และ Z ดังนั้นเมตริกซ์ของตัวแปรความผิดพลาดเนื่องจากการเลื่อนจะเป็นดังสมการที่ (2.6)

$$\tilde{E}_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

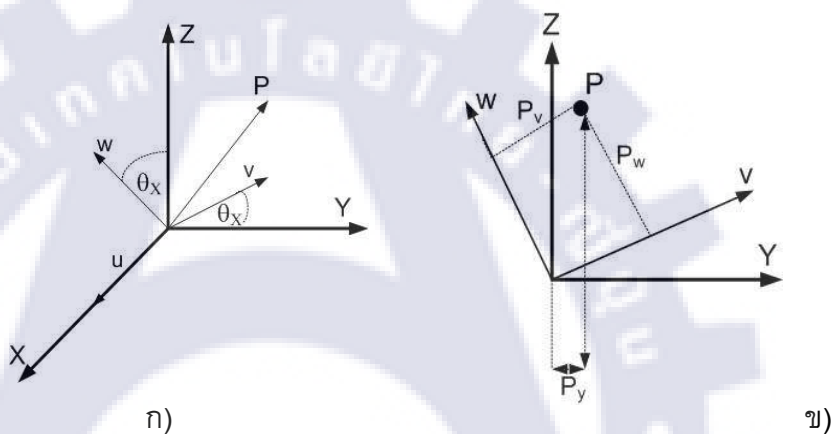
2.6 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการหมุน

การหมุนเกิดจากการที่กรอบอ้างอิงหรือวัตถุมีการหมุนรอบแกน X, Y หรือ Z แกนใดแกนหนึ่งใน 3 มิติ โดยที่ไม่มีการเลื่อนเกิดขึ้น สมมติให้กรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ที่มีพิกัด (P_u, P_v, P_w) อยู่บนระบบพิกัดและตั้งอยู่บนกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$ ที่มีพิกัด (P_x, P_y, P_z) ดังรูปที่ 2.3 (Lee. 1999)



รูปที่ 2.3 แสดงกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$

จากนั้นเมื่อกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ หมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ_x ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพ 3 และ 2 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ก) ภาพ 3 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ_x และ ข): มุมมอง 2 มิติของภาพด้านซ้ายมือ

หลังจากการหมุนแล้วพิกัด (P_u, P_v, P_w) เทียบกับกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ยังเหมือนเดิม แต่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$ จะเป็นดังนี้

$$P_x = P_u \quad (2.7)$$

$$P_y = P_v \cos \theta_x - P_w \sin \theta_x \quad (2.8)$$

$$P_z = P_v \sin \theta_x + P_w \cos \theta_x \quad (2.9)$$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

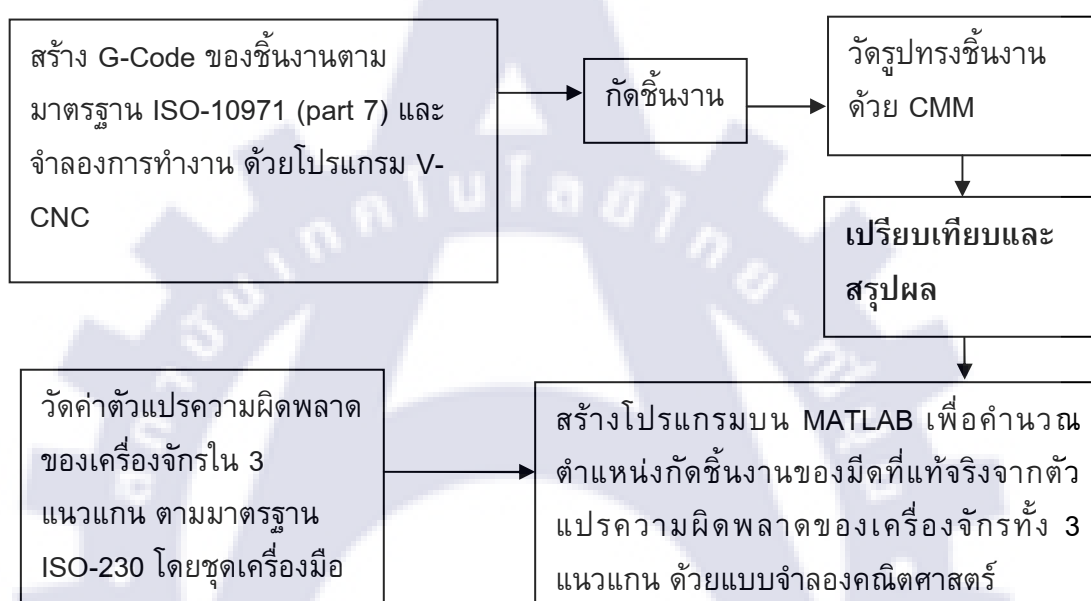
ปัจจุบันเครื่องจักรที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมในกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูป (Machining) ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองจำนวนและคุณภาพของการผลิตชิ้นส่วนที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เครื่องจักรซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมได้ถูกพัฒนาเป็นเครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) เพื่อให้สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนได้โดยอัตโนมัติ และด้วยความถูกต้องในระดับสูง เมื่อชิ้นส่วนมีความถูกต้องตามที่ได้ออกแบบจะทำให้การประกอบเป็นชิ้นงานสำเร็จได้อย่างรวดเร็ว และได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีความทนทานสูง ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ เครื่องจักร CNC ที่ใช้ผลิตจะต้องสามารถรักษาความเที่ยงตรง (Precision) และความถูกต้อง (Accuracy) ที่ดีอยู่ตลอดเวลา

ในการทำการผลิต การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นหรือ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรง และความถูกต้องของเครื่องจักรเป็นประจำทุกปี เพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรยังคงรักษาสภาพของความถูกต้องในการทำงานอยู่ตลอดเวลา โดยการตรวจสอบส่วนใหญ่จะดำเนินการตามมาตรฐาน 2 มาตรฐาน คือ ISO-230 (Test Code for Machine Tools) และ ISO-10791 (Machining Center Test Condition)

การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230 จะใช้ชุดเครื่องมือ Laser Interferometer System (LIS) ทำการตรวจสอบ ซึ่งจะได้รายละเอียดของความผิดพลาดภายในของเครื่องจักรอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามชุดเครื่องมือ LIS นั้นมีราคาแพง และต้องการผู้เชี่ยวชาญในการใช้ชุดเครื่องมือดังกล่าว จึงเป็นการยากที่ภาคอุตสาหกรรมระดับ SMEs จะสามารถกระทำได้

การทดสอบเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-10791 เป็นวิธีการทดสอบความผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูป โดยพิจารณาที่ความผิดพลาดของรูปทรง หรือที่เรียกว่า Geometric Dimensioning and Tolerance (GD & T) ในการทดสอบนี้ชิ้นงานทดสอบ จะต้องถูกขึ้นรูปโดยเครื่องจักรที่ต้องการตรวจสอบ แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัด 3 แกน (Coordinate Measuring Machine, CMM) จะทำให้ทราบว่าคุณภาพการทำงานของเครื่องจักรทำให้เกิดความผิดพลาดในรูปทรงของชิ้นงานมากน้อยแค่ไหน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าว เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ต้องการผู้เชี่ยวชาญพิเศษ แต่จะไม่สามารถให้รายละเอียดของความผิดพลาดภายในของเครื่องจักรอย่างสมบูรณ์ดังเช่นการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-230

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องจักรที่มีราคาไม่แพง รวดเร็ว โดยให้มีความถูกต้องในการตรวจสอบที่ยอมรับได้ และมีความน่าเชื่อถือเพื่อลดต้นทุนจากการจ้างผู้เชี่ยวชาญพิเศษ โดยทำการศึกษา ความผิดพลาดในรูปทรงของชิ้นงานที่เกิดจากการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ISO-10791 มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรความผิดพลาดในแนวแกนต่างๆของเครื่องจักรที่ทำการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-230 อย่างไร ซึ่งเครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือ เครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33 ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น และมีการดำเนินงานการวิจัยดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังการดำเนินงาน

จากรูปที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งการทดสอบความผิดพลาดของเครื่องจักรตามมาตรฐานทั้งสองมาตรฐานคือ ISO-10791 และ ISO-230 โดยเริ่มจากการกัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 (part 7) ประเภท A จากนั้นทำการตรวจวัดรูปทรงของชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM และเก็บค่าไว้เปรียบเทียบ

ในส่วนของมาตรฐาน ISO-230 จะทำการวัดตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรทั้ง 3 แนวแกน ด้วยชุดเครื่องมือ LIS จากนั้นคำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมิตกัดโดยอาศัยสมการของการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Kinematics of Rigid Body) แล้วจึงทำการเปรียบเทียบ และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของรูปทรงที่ได้จากวิธีการตามมาตรฐาน ISO-10791

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับความผิดพลาดทางรูปทรงของชิ้นงานว่ามีความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับใด

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

พิจารณาความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ในแนวตรงของเครื่องจักรเนื่องจากตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในแนวแกน X และ Y ตามมาตรฐาน ISO-230 และจากการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบกับความผิดพลาดของรูปทรงในแนวตรง (Straightness) ที่เกิดจากกระบวนการตัดแต่งชิ้นรูปของเครื่องจักรที่ตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-10791

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้วิธีการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO-10791 เพื่อการประมาณค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในการเคลื่อนที่แนวตรงตามมาตรฐาน ISO-230 เนื่องจากการตรวจสอบเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO-10791 นั้นจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ และไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การสอบเทียบ (Calibration) เป็นกระบวนการที่ทำให้เครื่องจักรมีความถูกต้องอยู่ตลอดเวลา โดยทั่วไปแล้วการสอบเทียบต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องสูงกว่าเครื่องจักรที่ต้องการสอบเทียบ ในปัจจุบันใช้ชุด Laser Interferometer System (LIS) เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน ซึ่งให้ผลการตรวจวัดที่มีความถูกต้อง และมีความเที่ยงตรงสูง แต่การตรวจวัดใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีการศึกษาถึงวิธีการสอบเทียบเครื่องจักรในหลายรูปแบบ เพื่อให้สามารถทำการตรวจสอบได้สะดวก รวดเร็วขึ้น และมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

ในช่วงเวลา 10 ปีมานี้ได้มีผู้พัฒนาวิธีการต่างๆ ดังนี้ Okafor และ Ertekin ได้เสนอวิธีการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็ง และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้เมตริกซ์เอกพันธ์เพื่อคำนวณหาตำแหน่งความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC, Cincinnati Milacron Sabre 750 อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร (Okafor; and Ertekin. 1999) หลังจากนั้น W. Nerdnoi ได้ทำการเสนอผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาการวัดหาค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรโดยใช้ Laser Interferometer Tracking System (LITS) ด้วยระบบ Tracking System จะสามารถทำให้ชุดเครื่องวัดเลเซอร์ สามารถตรวจสอบตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรได้หลายแนวแกน (X, Y และ Z) โดยไม่ต้องเสียเวลาในการจัดแนวชุดเครื่องวัดที่ละแนวแกน (Warakom Nerdnoi. 1999)

ต่อมา J.P. Choi ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนา การตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในเครื่องจักร โดยเปลี่ยนจากตรวจสอบด้วยเครื่อง CMM เป็นการวัดขนาดชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังอยู่บนเครื่องจักร (On-Machine measurement : OMM) เปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากเครื่องจักร โดยแบบจำลองค่าความผิดพลาดนั้นสร้างขึ้นจากสมการพหุนาม และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสที่ติดตั้งบนเครื่องจักร โดยการใช้ลูกบาศก์ (Cube Array Artifact) ทั้งหมด 9 ลูกบาศก์ ที่สามารถวัดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสทั้งการเคลื่อนที่ขาไปและกลับ แต่ก่อนที่จะติดตั้ง Artifact บนเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักร จะต้องมีการสอบเทียบ artifact โดยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน ซึ่งผลต่างของค่าตำแหน่งของการวัดทั้งขาไปและขากลับของเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักรกับเครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบ 3 แกนจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่นำไปใส่ในสมการพหุนามเพื่อทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร (Choi; Min; and Lee. 2004)

งานวิจัยของ Chen เสนอวิธีการวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรทั้ง 21 ตัวแปร (รวมตัวแปรของการตั้งฉากซึ่งกันและกันในแนวแกน X, Y และ Z อีก 3 ตัวแปร) โดยใช้เครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer) วัดการกระจัดทั้งหมด 15 เส้นทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไป แล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนทั้ง 21 ตัวแปรของเครื่องจักร 3 แกน ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้องแม่นยำ (Chen; Yuan; and Ni. 2000)

ต่อมา Manukid ได้เสนอวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรอันเนื่องมาจากโครงสร้างและน้ำหนัก โดยใช้วิธีการ Neural Network และในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรนั้น ได้รวมความผิดพลาดที่เกิดจากแรงที่มีผลต่อเครื่องจักร (Raksiri; and Parnichkun. 2004)

หลังจากนั้นในงานวิจัยของ Zhu ได้เสนอการปรับปรุงวิธีการวัดและการชดเชยตัวแปรความผิดพลาดเหล่านี้โดยพัฒนาโปรแกรมที่รวมเอาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร (Geometric Error Model) กับการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC ให้โปรแกรมเข้าไปชดเชยความผิดพลาดที่ G-Code หลังจากนั้นได้ทดลองนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักร CNC 5 แกน (Zhu; et al. 2011)

2.2 ประเภทของความผิดพลาดของเครื่องจักร

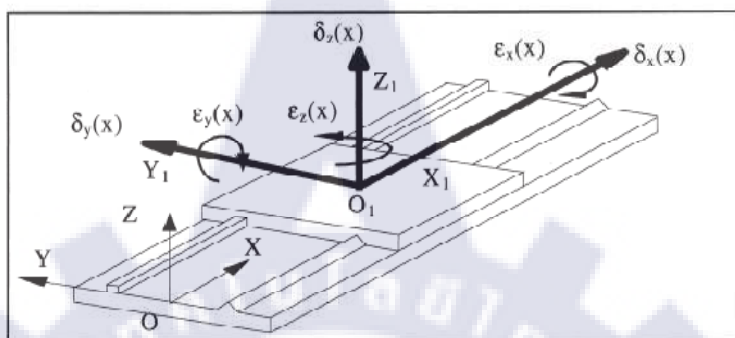
กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความผิดพลาดของเครื่องจักร ได้จำแนกประเภทความผิดพลาดของเครื่องจักรออกเป็น 2 ประเภทคือ (Ferreira; and Liu. 1993)

2.2.1 Quasistatic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยภายในของเครื่องจักรเกิดความผิดพลาด (Geometric Error) หรือเกิดจากความผิดพลาดในการประกอบชิ้นส่วนย่อยดังกล่าว นอกจากนั้นอาจเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนย่อยเมื่อมีการใช้งานเครื่องจักรไประยะเวลาหนึ่ง รวมถึงความผิดพลาดที่เกิดจากน้ำหนักและอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดความเครียดในชิ้นงาน แล้วส่งผลไปทำให้โครงสร้างตัวเครื่องจักรผิดรูปไปจากเดิม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความผิดพลาดประเภทนี้เป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้เครื่องจักรเกิดความผิดพลาดถึงร้อยละ 70

2.2.2 Dynamic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดจากการหมุนของแกนมีด หรือแรงสั่นสะเทือนในโครงสร้างของเครื่องจักร หรือความผิดพลาดในระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

2.3 ตัวแปรความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

ตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเลื่อน (Linear Error Parameters) ซึ่งประกอบไปด้วย Straightness Error และ Scale Error และ ประเภทที่สอง คือ ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการหมุน (Angular Error Parameters) ซึ่งประกอบไปด้วย Roll, Pitch และ Yaw ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวแปรความผิดพลาดเมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามแกน X

ที่มา : A.C. Okafor; and Y.M. Ertekin. (1999, November). **Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center Using Rigid Body Kinematics.** p. 1,200.

โดยให้ δ_x คือ Scale error ซึ่งจะเกิดขึ้นตามทิศทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่
 δ_y และ δ_z คือ Straightness error ในแนวระนาบ และแนวตั้งตามลำดับ
 ϵ_x คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน X (Roll)
 ϵ_y คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน Y (Pitch)
 ϵ_z คือความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน Z (Yaw)

ทั้งหมดนี้เป็นค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ในแกนเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วเครื่องจักรที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีการเคลื่อนที่ทั้งหมดอย่างน้อย 3 แกนด้วยกัน ดังนั้นตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นรวมแล้วจะมีทั้งหมด 18 ตัวแปร นอกจากนี้ยังมีความผิดพลาดของค่าความตั้งฉากระหว่างทั้ง 3 แกน อีก 3 ตัวแปร ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงจำนวนตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ 3 แกน

ชนิดของความผิดพลาด	จำนวนตัวแปร
Scale Error	3
Straightness Error	6
Angular Error	9
Squareness Error	3
รวม	21

2.4 การคำนวณตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่เกิดการเลื่อนและการหมุน โดยใช้เมตริกซ์จัตุรัสและเมตริกซ์เอกพันธ์

เมตริกซ์จัตุรัสนั้นเป็นเมตริกซ์ที่มีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนหลัก และยังง่ายต่อการหาผลคูณและการหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ ในขณะที่เดียวกันเมตริกซ์เอกพันธ์ก็เป็นเมตริกซ์ที่มีคุณสมบัติในการกำหนดตำแหน่งและกรอบ เนื่องจากคุณสมบัติของเมตริกซ์เอกพันธ์คือจำนวนสมาชิกที่อยู่ในเมตริกซ์นั้นจะต้องเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยและตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นถ้าต้องการจะกำหนดพิกัดและตำแหน่งอ้างอิงด้วยเมตริกซ์จัตุรัสที่เป็นเมตริกซ์เอกพันธ์ควรจะกำหนดดังตัวอย่างในสมการที่ (2.1) (Kay. 2005)

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} U_x & W_x & V_x & P_x \\ U_y & W_y & V_y & P_y \\ U_z & W_z & V_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

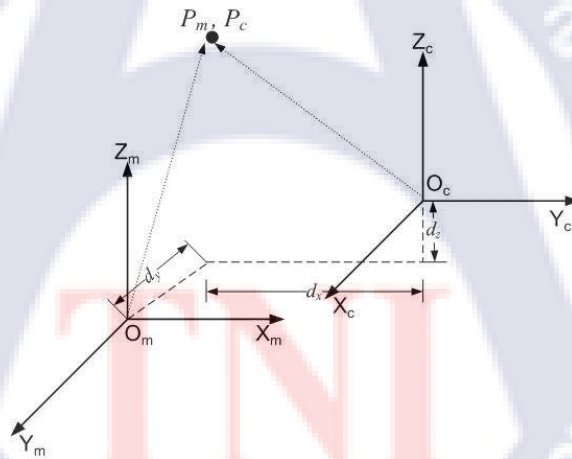
โดย w คือ Weighting Factor ใช้ในกรณีที่มองภาพเป็นสามมิติเสมือนจริงหรือ (Perspective View) ซึ่งค่า w จะมีค่ามากเมื่อมองในมุมมองระยะใกล้ และมีค่าน้อยเมื่อมองจากระยะไกล

2.5 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการเลื่อน

การเลื่อน (Translation) เป็นการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ในทิศทางของวัตถุที่เคลื่อนที่โดยไม่มีการหมุนเกิดขึ้น โดยจะสามารถหาตำแหน่งของกรอบที่เลื่อนที่ไปเทียบกับกรอบอ้างอิงได้ โดยการบวกหรือลบเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่กรอบได้เคลื่อนที่ไป ตัวอย่างเช่น กรอบอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0, 0)$ จากนั้นเลื่อนกรอบอ้างอิงไปที่ตำแหน่ง (d_x, d_y, d_z) ดังนั้นเมตริกซ์การเลื่อนตำแหน่งที่เป็นทั้งเมตริกซ์เอกพันธ์ และเมตริกซ์จัตุรัสสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

โดยค่า d_x , d_y และ d_z เป็นค่าการเลื่อนในแกน X , Y และ Z ตามลำดับ จากสมการที่ (2.2) จะสังเกตเห็นได้ว่า สมาชิกในแถวที่ 1 หลัก 2 และ 3, สมาชิกในแถวที่ 2 หลัก 1 และ 3 และสมาชิกในแถวที่ 3 หลัก 1 และ 2 มีค่าเป็นศูนย์ นั้นแสดงถึงว่าการเคลื่อนที่นั้นเกิดเฉพาะการเลื่อนตำแหน่งและไม่เกิดการหมุน ดังนั้นในกรณีที่ยากทราบว่าตำแหน่งที่กรอบอ้างอิงเลื่อนไปมีค่าเป็นเท่าใดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม ทำได้โดยการเอาเมตริกซ์บอกการเลื่อนตำแหน่งไปคูณกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม ผลที่ได้จากการคูณนั้นก็จะเป็นตำแหน่งของกรอบอ้างอิงใหม่ ยกตัวอย่างเช่น จุด P_m ที่อยู่ในกรอบอ้างอิง O_m มีพิกัด (1, 2, 3) และกรอบอ้างอิง O_c เลื่อนจากกรอบอ้างอิง O_m ไปในทางแกน X เป็นระยะ d_x หน่วย เลื่อนไปทางแกน Y เป็น d_y หน่วย และเลื่อนไปทางแกน Z เป็น d_z หน่วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง O_m ไปยังกรอบอ้างอิง O_c

จากรูปที่ 2.2 จะสามารถเขียนเมตริกซ์การเลื่อนได้เป็น

$$\tilde{T}_c^m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

และสามารถเขียนเมตริกซ์ที่ระบุตำแหน่งของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง O_m ในระบบพิกัด X, Y และ Z คือ

$$\hat{P}_m = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ดังนั้นจุด P_c บนกรอบอ้างอิง O_c จะสามารถคำนวณได้โดยนำสมการที่ (2.3) คูณกับสมการที่ (2.4) จะเป็นดังสมการที่ (2.5)

$$\hat{P}_c = \tilde{T}_c^m \hat{P}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+d_x \\ 2+d_y \\ 3+d_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

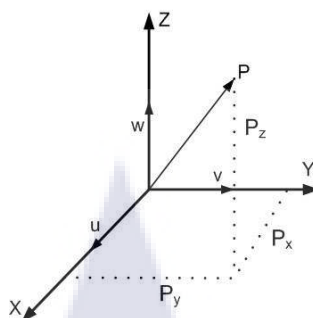
โดยสัญลักษณ์ $\tilde{T}_c^m$ เป็นการบอกว่าเมตริกซ์นี้คือเมตริกซ์ที่บอกตำแหน่งการเลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง O_c เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง O_m

ในกรณีที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X ดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้ δ_x คือ Scale Error และ δ_y และ δ_z คือ Straightness Error ในทิศทางแกน Y และ Z ดังนั้นเมตริกซ์ของตัวแปรความผิดพลาดเนื่องจากการเลื่อนจะเป็นดังสมการที่ (2.6)

$$\tilde{E}_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

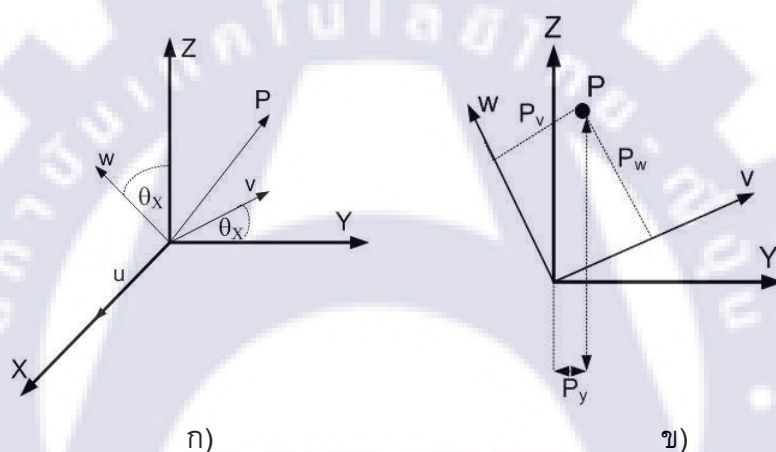
2.6 Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการหมุน

การหมุนเกิดจากการที่กรอบอ้างอิงหรือวัตถุมีการหมุนรอบแกน X, Y หรือ Z แกนใดแกนหนึ่งใน 3 มิติ โดยที่ไม่มีการเลื่อนเกิดขึ้น สมมติให้กรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ที่มีพิกัด (P_u, P_v, P_w) อยู่บนระบบพิกัดและตั้งอยู่บนกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$ ที่มีพิกัด (P_x, P_y, P_z) ดังรูปที่ 2.3 (Lee. 1999)



รูปที่ 2.3 แสดงกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$

จากนั้นเมื่อกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ หมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ_x ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพ 3 และ 2 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ก) ภาพ 3 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ_x และ ข): มุมมอง 2 มิติของภาพด้านซ้ายมือ

หลังจากการหมุนแล้วพิกัด (P_u, P_v, P_w) เทียบกับกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ยังเหมือนเดิม แต่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$ จะเป็นดังนี้

$$P_x = P_u \quad (2.7)$$

$$P_y = P_v \cos \theta_x - P_w \sin \theta_x \quad (2.8)$$

$$P_z = P_v \sin \theta_x + P_w \cos \theta_x \quad (2.9)$$

ซึ่งถ้านำสมการ (2.7), (2.8) และ (2.9) ทั้ง 3 สมการนี้มาจัดรูปแบบให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ก็จะได้เมตริกซ์จัตุรัสที่มีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์เอกพันธ์ และเป็นเมตริกซ์ที่บ่งบอกการหมุนด้วย ดังนี้

$$\tilde{\mathbf{R}}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) จะเห็นได้ว่าแถวที่ 1 ไม่มีพจน์ของ Sine และ Cosine เกิดขึ้น เนื่องจากว่าแกน X ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการหมุนรอบแกน X และสมาชิกหลักสุดท้ายในเมตริกซ์แสดงการหมุนทั้งหมดจะเป็นศูนย์เนื่องจากการไม่มีการเลื่อนเกิดขึ้น

สมการที่ (2.10) ยังสามารถบอกได้อีกว่าเมื่อนำเอาเมตริกซ์เอกพันธ์ที่บ่งบอกการหมุนมาคูณกับพิกัดที่ทราบแน่ชัดของกรอบอ้างอิงที่หมุนไป ก็จะได้พิกัดที่แท้จริงของกรอบอ้างอิงหมุนเทียบกับกรอบอ้างอิงเดิม ดังนั้นถ้าเกิดการหมุนของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ในแกน Y และ Z เป็นมุม θ_y และ θ_z ตามลำดับ ก็จะสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$\tilde{\mathbf{R}}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.10), (2.11) และ (2.12) มาคูณกันเพื่อหาเมตริกซ์การหมุนของทั้งสามแกนจะเป็นดังสมการที่ (2.13)

$$\tilde{\mathbf{R}}_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & -\cos \theta_y \sin \theta_z & \sin \theta_y & 0 \\ \cos \theta_x \sin \theta_z + \cos \theta_z \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & -\cos \theta_y \sin \theta_x & 0 \\ \sin \theta_x \sin \theta_z - \cos \theta_x \cos \theta_z \sin \theta_y & \cos \theta_z \sin \theta_x + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

เมื่อมุม θ_x , θ_y และ θ_z มีค่าน้อยๆ ดังนั้น

$$\cos\theta_x \approx 1, \cos\theta_y \approx 1, \cos\theta_z \approx 1$$

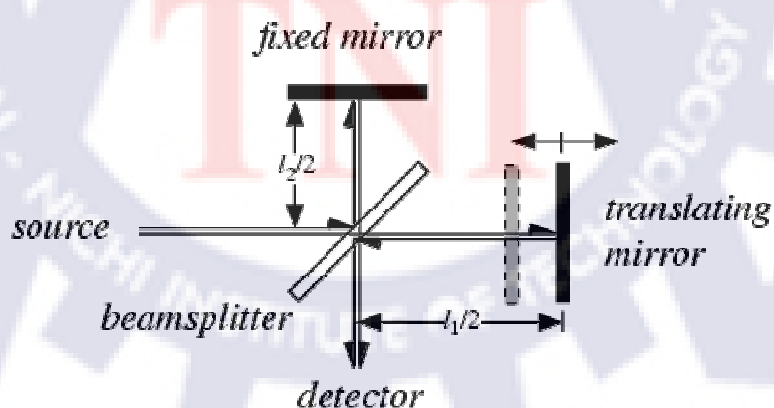
$$\text{และ } \sin\theta_x \approx \theta_x = \varepsilon_x, \sin\theta_y \approx \theta_y = \varepsilon_y, \sin\theta_z \approx \theta_z = \varepsilon_z$$

กำหนดให้สัญลักษณ์ ε คือค่าความผิดพลาดเนื่องจากการหมุน ดังนั้นสมการความผิดพลาดเนื่องจากการหมุน คือ

$$\tilde{\mathbf{E}}_{rot} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & 0 \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & 0 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

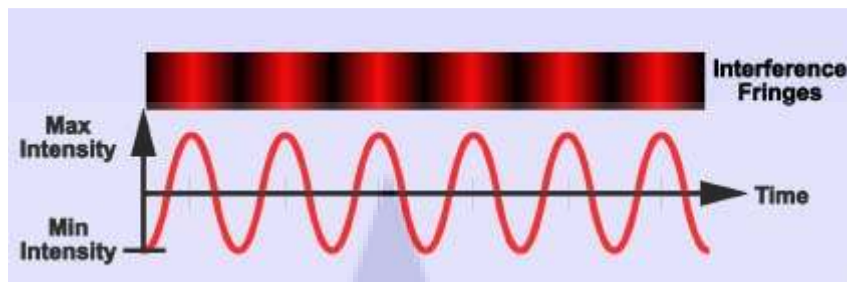
2.7 หลักการทำงานของ Michelson Interferometer

หลักการทำงานพื้นฐานของชุดเครื่องมือ LIS อ้างอิงจากหลักการทำงานของ Michelson Interferometer ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือเครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ (Source) จะยิงลำแสงเลเซอร์ไปที่กระจกแยกลำแสง (Beam Splitter) กระจกแยกลำแสงจะแยกลำแสงเลเซอร์เป็น 2 ลำด้วยกัน ลำแสงแรกจะสะท้อนไปที่กระจกตัวที่ยึดติดอยู่กับที่ (Fixed mirror) ซึ่งเรียกว่าลำแสงอ้างอิง ในขณะที่เดียวกันลำแสงที่สองจะมุ่งไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Translating Mirror) จากนั้นลำแสงทั้งสองจะสะท้อนกระจกกลับมาที่ตัวตรวจวัดความเข้มแสง (Detector) และเกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงทั้งสอง เมื่อ Translating Mirror เคลื่อนที่จะเกิดเป็นสัญญาณความมืด และความสว่างขึ้นที่ตัว Detector ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ Michelson Interferometer

ที่มา : Rossini Jeffrey. (2010). **Infrared Spectroscopy**. Online.

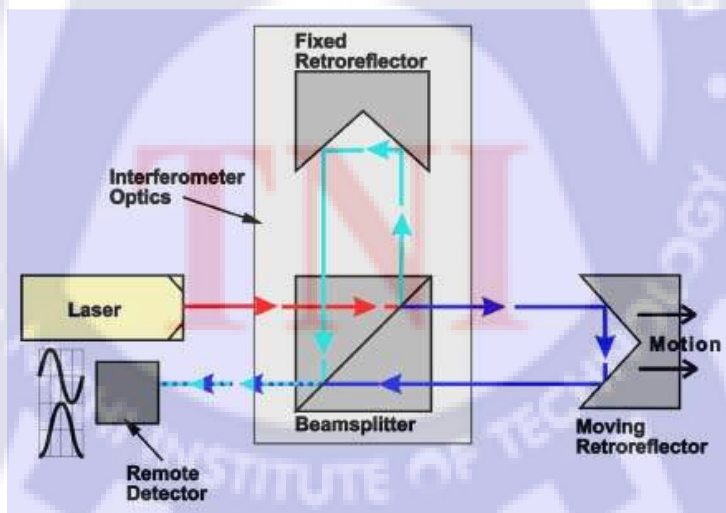


รูปที่ 2.6 การแทรกสอดของคลื่นแสงอ้างอิงกับคลื่นแสงที่สะท้อนจากกระจกที่เคลื่อนที่

ที่มา : Aerotech. (2011). **Laser Interferometer Implementation.** Online.

2.8 หลักการทำงานของเครื่องวัดเลเซอร์ Renishaw ML10

จากหลักการทำงานของ Michelson Interferometer จึงทำให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือวัดโดยใช้แสงเลเซอร์หรือ Laser Interferometer และได้เปลี่ยนจากการใช้กระจกมาใช้อุปกรณ์สะท้อนแสงที่สะดวกในการใช้งานมากกว่าคือ Retro-Reflector ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถสะท้อนแสงกลับในแนวขนานกับลำแสงที่ตกกระทบกับตัวกระจกได้เสมอ จากรูปที่ 2.7 แสดงระบบการวัดโดยใช้เครื่องวัดเลเซอร์ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 2.7 ระบบการวัดโดยชุดเครื่องมือ LIS (Laser Interferometer System)

ที่มา : Aerotech. (2011). **Laser Interferometer Implementation.** Online.

2.8.1 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ : ให้กำเนิดแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 633 nm

2.8.2 Beam Splitter: ทำหน้าที่แยกลำแสงเป็น 2 ลำแสง ลำแสงแรกสะท้อนไปยัง Retro-Reflector ที่อยู่กับที่ และลำแสงที่สองทะลุผ่าน Beam Splitter ไปยัง Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่

2.8.3 Retro-Reflector : แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน

(1) Fixed Retro-Reflector: จะให้สัญญาณคลื่นแสงที่สะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจจับมีค่าคงที่ เนื่องจาก Retro-Reflector ยึดติดอยู่กับที่ ดังนั้นจะให้สัญญาณแสงที่สะท้อนกลับจาก Fixed Retro-Reflector เป็นสัญญาณอ้างอิง

(2) Moving Retro-Reflector: Retro-Reflector ตัวที่เคลื่อนที่ โดยที่เมื่อ Retro-Reflector ตัวนี้เคลื่อนที่ไปจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจจับมีระยะทางเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดกับสัญญาณแสงอ้างอิง

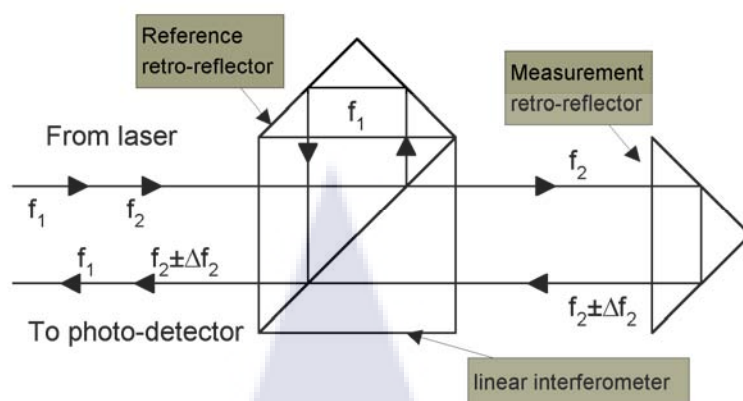
2.8.4 เครื่องตรวจจับ (Detector): ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณการแทรกสอดของคลื่นแสงโดยแปลงจากสัญญาณมืด, สว่าง, มืด, สว่าง.. เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าออกมาจากเครื่องตรวจจับ การนับจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสัญญาณจะสามารถนำไปคำนวณหาระยะทางการเคลื่อนที่ของ Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่ได้

เนื่องจากความยาวคลื่นของแสง Laser นั้น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) ซึ่งเปลี่ยนค่าไปตามตัวกลางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่าน ทั้งนี้ดัชนีการหักเหแสงของอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นของบรรยากาศ ดังนั้นในการคำนวณระยะทางที่ Moving Retro-Reflector เคลื่อนที่ไปอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุนี้ในระบบการวัดเลเซอร์จึงได้พัฒนาเซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิเพื่อชดเชยค่าความเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหแสงในระบบการวัดด้วยเลเซอร์

2.9 การคำนวณและการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรด้วยชุดเครื่องมือ LIS

2.9.1 การวัดแนวตรง

การใช้ชุดเครื่องมือ LIS ทำการวัดค่า Scale Error และ Straightness Error จะทำการจัดวาง Beam Splitter และ Retro-Reflector ดังรูปที่ 2.8



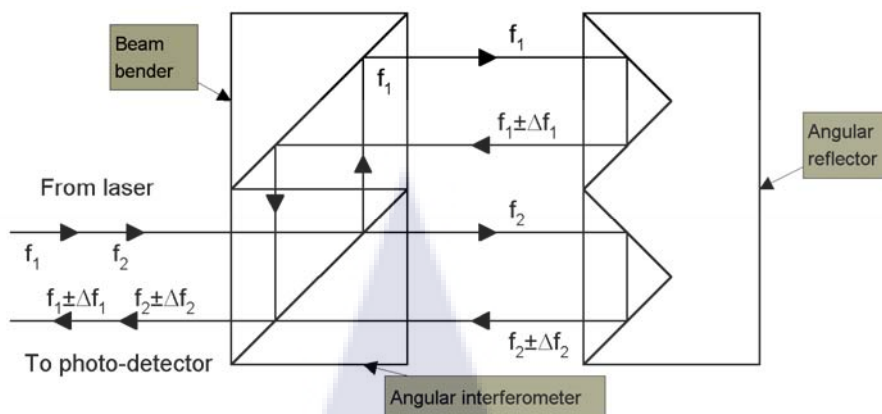
รูปที่ 2.8 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector เพื่อทำการวัดแนวตรง

ที่มา : Warakom Nerdnoi. (1999, November). **3D Laser Interferometer Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration.** p.31.

จากรูปที่ 2.8 ลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงมาจากเครื่องกำเนิดแสงเข้าสู่ Beam Splitter เพื่อทำการแยกลำแสงออกเป็นสองลำ ลำแสงแรกจะสะท้อนไปยัง Retro-Reflector ที่ยึดติดอยู่กับที่ แล้วกลับไปเครื่องตรวจวัด ด้วยเหตุนี้ลำแสงแรกจึงใช้เป็นลำแสงอ้างอิง ในขณะที่ลำแสงที่สองจะผ่าน Beam Splitter ไปสะท้อนกับ Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่หรือตำแหน่งเป้าหมายของการวัดแล้วกลับมาที่เครื่องตรวจวัดสัญญาณ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของลำแสงทั้งสองลำนี้ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแสง จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถคำนวณระยะทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปได้ (Warakom Nerdnoi. 1999 : 30-32)

2.9.2 การวัดมุม

การวัดความคลาดเคลื่อนอันเกิดเนื่องจากมุมที่หมุนไปของเครื่องจักร จะทำการจัดวาง Beam Splitter และ Retro-Reflector ดังรูปที่ 2.9



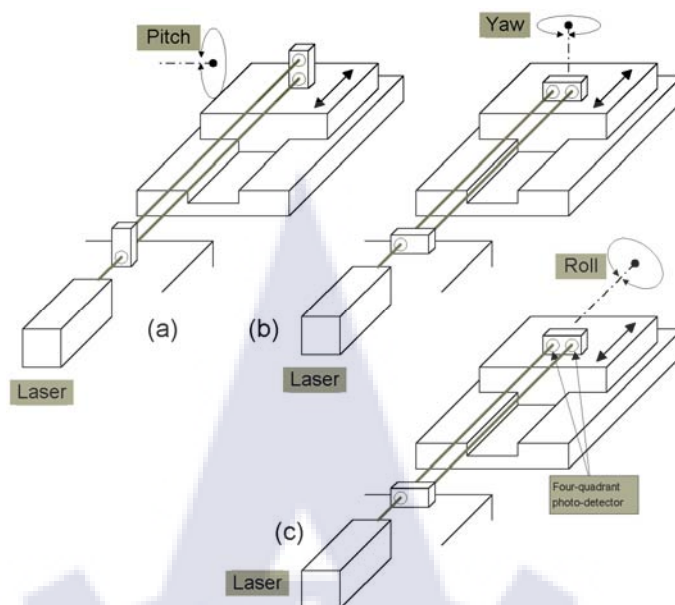
รูปที่ 2.9 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector ในการวัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุม

ที่มา : Warakom Nerdnoi. (1999, November). **3D Laser Interferometer Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration.** p.32.

ในการวัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุมของเครื่องจักร การติดตั้ง Retro-Reflector จะแตกต่างจากวัดแนวตรงเล็กน้อย จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการวัดมุมความคลาดเคลื่อนนั้น นอกจากจะติดตั้ง Beam Splitter แล้วยังติดตั้งอุปกรณ์หักเหแสงอีกหนึ่งตัว เรียกว่า Beam Bender ทำหน้าที่หักเหแสงให้ตั้งฉากกับรังสีตกกระทบ อีกทั้งติดตั้ง Retro-Reflector 2 ตัวชิดติดกันเรียกว่า Angular Reflector หรือ Twin Reflector

สำหรับการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุมจะมีหลักการทำงานคือ แสงเลเซอร์ถูกยิงจากเครื่องกำเนิดแสงเข้าสู่ Beam Splitter ที่ทำหน้าที่แยกลำแสงออกเป็นสองลำแสง โดยที่ลำแสงที่หนึ่ง มีความถี่ f_1 เมื่อวิ่งผ่าน Beam Splitter แล้วจะไปสะท้อนกับ Beam Bender ซึ่งทำหน้าที่หักเหคลื่นแสง จากนั้นลำแสงจะเคลื่อนที่ไปตกกระทบบัง Angular Reflector สะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจวัดสัญญาณคลื่นแสง ขณะเดียวกันลำแสงที่สอง มีความถี่ f_2 จะวิ่งทะลุผ่าน Beam Splitter ไปยัง Angular Reflector อีกตัวหนึ่ง แล้วสะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจวัดสัญญาณเช่นกัน

ครั้งแรกที่เริ่มทำการวัดจะสังเกตได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดเนื่องจากมุมคือมุม 0° แต่เมื่อ Angular Reflector ตัวใดตัวหนึ่งหมุน จะทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงทั้งสองลำ ซึ่งค่าความแตกต่างของรั้วการแทรกสอดจะมีค่าเท่ากับ $\Delta f_2 - \Delta f_1$ จึงทำให้ระบบประมวลผลของระบบการวัดเลเซอร์สามารถคำนวณหาค่ามุมที่เปลี่ยนไปในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรได้



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร
เนื่องจากมุมบนตัวเครื่องจักร

ที่มา : Warakom Nerdnoi. (1999, November). **3D Laser Interferometer Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration.** p.32.

การวัดมุมความคลาดเคลื่อนที่หมุนรอบแกน X หรือ Pitch ตามรูปที่ 2.10 (a) จะติดตั้งอุปกรณ์ไว้ตั้งฉากกับโต๊ะของเครื่องจักรเพื่อวัดมุมที่หมุนรอบแกน X ในส่วนของการวัดมุมความคลาดเคลื่อนที่หมุนรอบแกน Z หรือ Yaw ตามรูปที่ 2.10 (b) จะติดตั้งอุปกรณ์การวัดขนานกับโต๊ะของเครื่องจักร เพื่อวัดการหมุนรอบแกน Z ที่เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม จะสามารถสังเกตได้ว่าการวัดมุมที่หมุนรอบแกน Y หรือ Roll ดังรูปที่ 2.10 (c) จะไม่สามารถวัดได้เนื่องจากอุปกรณ์ไม่สามารถหมุนรอบแกน Y ได้ ดังนั้นในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกน Y จะใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นมาวัดแทน เช่น Four-Quadrant Photodiode

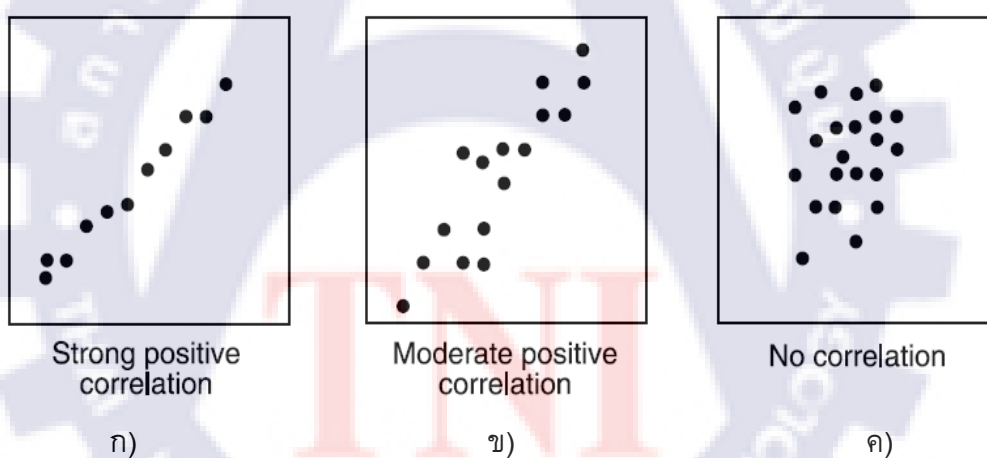
2.10 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Analysis)

สหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือระหว่างข้อมูล 2 ชุด เพื่อดูว่าตัวแปรเหล่านั้นมีอิทธิพลหรือความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันมากน้อยเพียงใด โดยข้อมูลทั้งสองชุดที่นำมาหาความสัมพันธ์นั้นจะต้องเป็นข้อมูลที่มาจากกลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียวกัน หรือได้มาจากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ที่มีลักษณะจับคู่กันโดยหลักการบางอย่าง อาทิเช่น พ่อกับลูก เป็นต้น (ชูศรี วงศ์รัตน์. 2544)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Coefficient) หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Product-Moment Correlation Coefficient) ใช้สัญลักษณ์คือ R หรือ R_{xy} เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของค่าความตรงของเครื่องจักร เนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นชุดข้อมูลที่ต่อเนื่อง

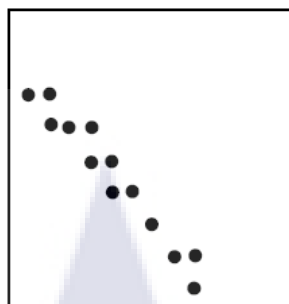
2.10.1 ลักษณะของข้อมูลสัมพันธ์กัน

การหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนั้น ขั้นแรกให้นำข้อมูลทั้งสองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ หรือที่เรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) ซึ่งจากแผนภาพการกระจายที่ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองอาจอยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่น เส้นตรง พาราโบลา เอ็กซ์โพเนนเชียล เป็นต้น (สายชล สินสมบูรณ์ทอง. 2551) รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ในกรณีความสัมพันธ์ระดับสูง, กลาง และไม่มีความสัมพันธ์ตามลำดับ และรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางตรงกันข้าม



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางเดียวกัน ก) สัมพันธ์ระดับสูง, ข) สัมพันธ์ระดับปานกลางและ ค) ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ที่มา : Peter Bersbach. (2012, March). **Scatter Plot for Visualization of Relationship**. Online.



Strong negative correlation

รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางตรงกันข้าม

ที่มา : Peter Bersbach. (2012, March). **Scatter Plot for Visualization of Relationship.** Online.

2.10.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันและการแปล

ความหมาย

การคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันมีสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.1)

$$R = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

R แสดงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

X แสดงข้อมูลตัวแปรต้น

Y แสดงข้อมูลตัวแปรตาม

N แสดงจำนวนคนหรือจำนวนของข้อมูลที่ศึกษา

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จะอยู่ในช่วง $-1 \leq R \leq 1$ ซึ่งผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้ จะแปลความหมายว่าชุดข้อมูลสองชุดนั้นมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ระดับใดและสัมพันธ์กันอย่างไร แต่จะไม่แปลว่าตัวแปรหนึ่งเป็นสาเหตุของอีกตัวแปรหนึ่งหรือตัวแปร 2 ตัวนั้นเป็นเหตุเป็นผลซึ่งกันและกัน ซึ่งมีวิธีการพิจารณาดังนี้

(1) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 (ประมาณ 0.70 ถึง 0.90) แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูง โดยถ้าสูงกว่า 0.90 ถือว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก

(2) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 0.50 (ประมาณ 0.30 ถึง 0.70) แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง

(3) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ศูนย์ (ประมาณ 0.30 หรือต่ำกว่า) แสดงว่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับต่ำ

(4) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงซึ่งกันและกัน (ชูศรี วงศ์รัตนะ. 2544)

(5) ค่า R เป็นบวกหมายถึงตัวแปรต้น X และตัวแปรตาม Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า X ลด Y ก็จะลดลงตามลำดับ

(6) ค่า R เป็นลบ หมายถึง ตัวแปรต้น X และตัวแปรตาม Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม คือถ้า X เพิ่มขึ้น Y ก็จะลดลง แต่ถ้า X ลดลง Y ก็จะเพิ่มขึ้น (สายชล สนิทสมบูรณ์ทอง. 2551)

2.10.3 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) หมายถึง สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้มากน้อยแค่ไหน ซึ่งการหาค่า R^2 อาจทำได้โดยการนำเอาค่า R มายกกำลังสองโดยที่ค่า R^2 จะไม่มีหน่วย และมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq R^2 \leq 1$ ยกตัวอย่างเช่น ค่า $R = 0.6$ ดังนั้น ค่า $R^2 = 0.36$ หรือ 36% ของความแปรปรวนของค่า Y ในตัวอย่างสามารถอธิบายโดยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงด้วยค่าของ X

ระดับความสัมพันธ์ของค่า R^2 สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง เปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้มาก หรือ มีความสัมพันธ์กันมาก

(2) R^2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง เปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้น้อย หรือ มีความสัมพันธ์กันน้อย

(3) R^2 มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 หมายถึง เปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้ปานกลาง หรือมีความสัมพันธ์กันปานกลาง (สายชล สนิทสมบูรณ์ทอง. 2551)

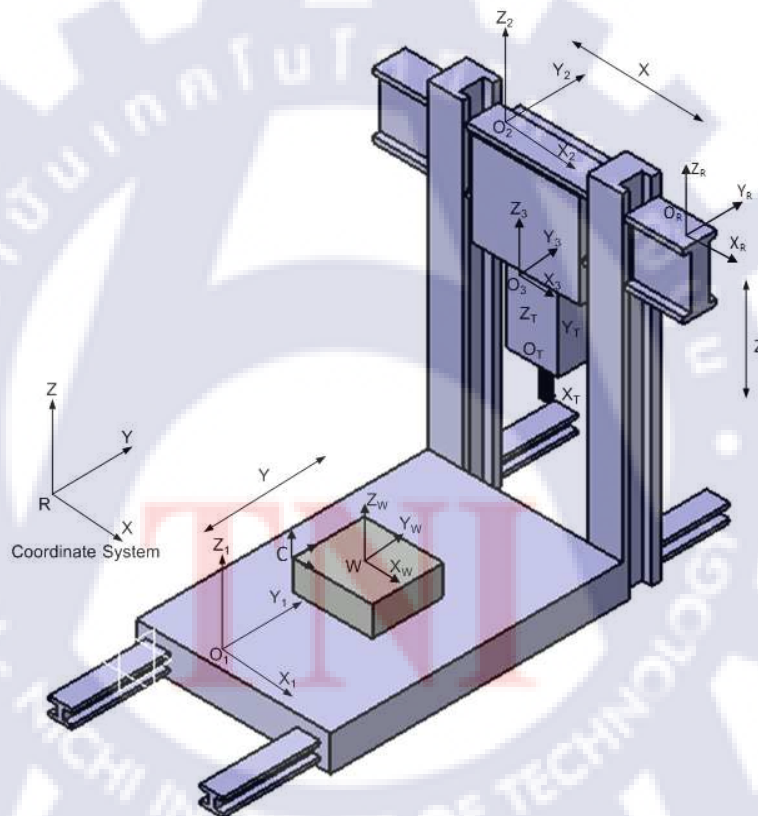
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

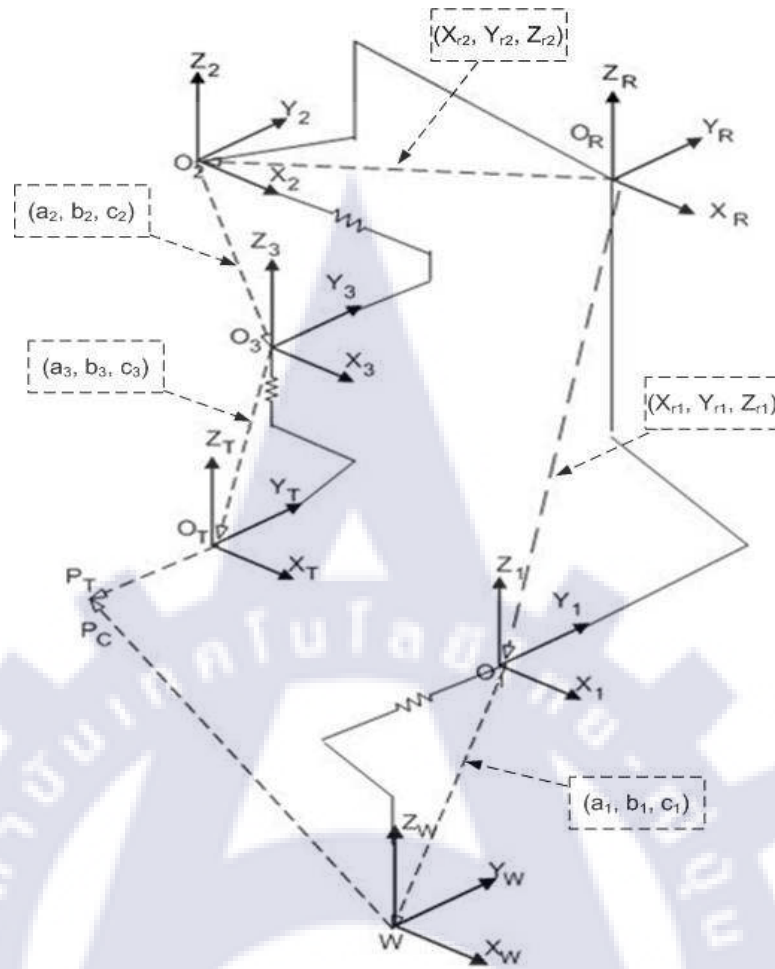
3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33

ชิ้นส่วนของเครื่องจักรนั้นจะถือว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ดังนั้นในการคำนวณหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดที่ผลิตพลาสติก โดยเครื่องจักร CNC จะใช้หลักการการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งโดยอาศัยคุณสมบัติของเมตริกซ์จัตุรัสและเอกพันธ์มาคำนวณ

เพื่อให้เข้าใจถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33 จึงได้กำหนดสัญลักษณ์และกรอบอ้างอิงต่างๆของเครื่องจักร ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แบบจำลองและระบบพิกัดของเครื่องจักร CNC Makino S33



รูปที่ 3.2 การกำหนด Coordinate Frame ของเครื่องจักร CNC Makino S33

พิจารณาที่โต๊ะงาน (กรอบอ้างอิง O_1) ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y เมทริกซ์เอกพันธ์ที่บอกตำแหน่งของเครื่องจักรเฉพาะการเคลื่อนที่ของแกน Y จากจุดศูนย์ของเครื่องจักร (กรอบอ้างอิง O_R) เทียบกับกรอบอ้างอิง X, Y และ Z เป็นดังสมการที่ (3.1)

$$\tilde{T}_{O_1}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r1} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r1} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

โดยที่ x_{r1} , y_{r1} และ z_{r1} เป็นระยะที่ห่างจากกรอบอ้างอิง O_R ในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ สำหรับค่าของ x_{r1} , y_{r1} และ z_{r1} สามารถดูได้จากคู่มือการติดตั้งของเครื่องจักร Makino, S33

ในกรณีอุดมคติ ถ้าเครื่องจักรเคลื่อนที่โดยที่ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นเลย เมทริกซ์เอกพันธ์ที่เทียบจากโต๊ะงาน (กรอบอ้างอิง O_1) มายังจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน (กรอบอ้างอิง O_W) จะเป็นดังสมการที่ (3.2)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{W \text{ ideal}}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่ a_1 , b_1 และ c_1 คือ ระยะห่างจากกรอบอ้างอิง O_1 มายังจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน (กรอบอ้างอิง O_W)

ถ้าตำแหน่งของโต๊ะงานที่เคลื่อนที่ไปเป็นตำแหน่ง $\hat{\mathbf{p}}_C^W(p_x, p_y, p_z)$ เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ดังสมการที่ (3.3)

$$\hat{\mathbf{p}}_C^W = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ดังนั้นจุดที่โต๊ะงานเคลื่อนไปเทียบกับศูนย์ของเครื่องจักรในอุดมคติเป็นดังสมการที่ (3.4)

$$\hat{\mathbf{p}}_{C \text{ ideal}}^R = \tilde{\mathbf{T}}_{O_1}^R \tilde{\mathbf{T}}_{W \text{ ideal}}^{O_1} \hat{\mathbf{p}}_C^W = \begin{bmatrix} a_1 + x_{r1} + p_x \\ b_1 + y_{r1} + p_y \\ c_1 + z_{r1} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

อย่างไรก็ตามแท้จริงแล้ว เมื่อเครื่องจักรเกิดการเคลื่อนที่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะของการเลื่อนที่และการหมุน ดังนั้นสมการที่ (3.2) จะกลายเป็น

$$\tilde{\mathbf{T}}_{W \text{ actual}}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z1} & \varepsilon_{y1} & a_1 + \delta_{x1} \\ \varepsilon_{z1} & 1 & -\varepsilon_{x1} & b_1 + \delta_{y1} \\ -\varepsilon_{y1} & \varepsilon_{x1} & 1 & c_1 + \delta_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดย δ_{y1} , δ_{x1} และ δ_{z1} คือ Scale Error และ Straightness Error ทางแกน X และ Z ตามลำดับ ในแนวแกนที่โต๊ะงานเคลื่อนที่ (แกน Y) และ ε_{y1} , ε_{x1} และ ε_{z1} คือ ค่าความผิดพลาดในการหมุน Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ

ดังนั้นจุดที่โต๊ะงานเคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับศูนย์ของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นตามจริง เป็นดังสมการที่ (3.6)

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{P}}_{C \text{ actual}}^R &= \tilde{\mathbf{T}}_{O_1 \text{ ideal}}^R \tilde{\mathbf{T}}_{W \text{ actual}}^{O_1} \hat{\mathbf{P}}_C^W \\ &= \begin{bmatrix} a_1 + x_{r1} + \delta_{x1} + p_x - \varepsilon_{y1}p_z + \varepsilon_{z1}p_y \\ b_1 + y_{r1} + \delta_{y1} + p_y + \varepsilon_{x1}p_z - \varepsilon_{z1}p_x \\ c_1 + z_{r1} + \delta_{z1} + p_z - \varepsilon_{x1}p_y + \varepsilon_{y1}p_x \\ 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.6)$$

ค่าความผิดพลาดของโต๊ะงานที่เคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับศูนย์ของเครื่องจักรคือ

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{\text{table}} = \hat{\mathbf{P}}_{C \text{ actual}}^R - \hat{\mathbf{P}}_{C \text{ ideal}}^R = \begin{bmatrix} \delta_{x1} + \varepsilon_{y1}p_z - \varepsilon_{z1}p_y \\ \delta_{y1} - \varepsilon_{x1}p_z + \varepsilon_{z1}p_x \\ \delta_{z1} + \varepsilon_{x1}p_y - \varepsilon_{y1}p_x \end{bmatrix}\quad (3.7)$$

พิจารณาที่หัวกัตชิ้นงาน (Spindle) ดัง (3.1) และ (3.2) ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ จะถือว่าไม่มีค่าความผิดพลาดทั้งการเลื่อนที่และการหมุนเกิดขึ้น ดังนั้นเมตริกซ์เอกพันธ์ที่บอกการเคลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง O_2 เทียบกับตำแหน่งศูนย์ของเครื่องจักร (กรอบอ้างอิง O_R) ในกรอบอ้างอิง X, Y และ Z เป็นดังสมการที่ (3.8)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_2 \text{ ideal}}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r2} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r2} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (3.8)$$

โดยที่ x_{r2} , y_{r2} และ z_{r2} คือระยะทางจากจุดศูนย์ของเครื่องจักรจนถึงกรอบอ้างอิง O_2

จากนั้นพิจารณาการเคลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง O_3 เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง O_2 ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติเป็นดังสมการที่ (3.9) กำหนดให้ a_2 , b_2 และ c_2 คือระยะห่างจากกรอบอ้างอิง O_2 กับกรอบอ้างอิง O_3

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_3 \text{ ideal}}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง O_3 เทียบกับการเคลื่อนที่ของดอกกัท (กรอบอ้างอิง O_T) ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ จะเป็นดังสมการที่ (3.10) กำหนดให้ a_3 , b_3 และ c_3 คือระยะห่างของกรอบอ้างอิง O_3 กับกรอบอ้างอิง O_T

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_T \text{ ideal}}^{O_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

โดยปกติแล้วหัวกัทของชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตัดเฉือนชิ้นงานที่ตำแหน่งเดียวกับโต๊ะงานตามสมการที่ (3.3) ซึ่งในการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ ตำแหน่งที่หัวกัทของชิ้นงานเคลื่อนที่ไปที่จุดตัดเฉือนเทียบกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน เป็นดังสมการที่ (3.11)

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_T^R \text{ ideal} &= \tilde{\mathbf{T}}_{O_2 \text{ ideal}}^R \tilde{\mathbf{T}}_{O_3 \text{ ideal}}^{O_2} \tilde{\mathbf{T}}_{T \text{ ideal}}^{O_3} \hat{\mathbf{p}}_T^W \\ &= \begin{bmatrix} a_2 + a_3 + p_x + x_{r2} \\ b_2 + b_3 + p_y + y_{r2} \\ c_2 + c_3 + p_z + z_{r2} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะเกิดความผิดพลาดขณะที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ทั้งการเลื่อนและการหมุน ดังนั้น เมตริกซ์เอกพันธ์ของหัวกัทชิ้นงานเทียบกับจุดศูนย์กลางของเครื่องจักร จะต้องรวมทั้งค่าความผิดพลาดทั้งการเลื่อนและการหมุน ดังนั้นสมการที่ (3.9) กลายเป็น

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_3 \text{ actual}}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z2} & \varepsilon_{y2} & \delta_{x2} + a_2 \\ \varepsilon_{z2} & 1 & -\varepsilon_{x2} & \delta_{y2} + b_2 \\ -\varepsilon_{y2} & \varepsilon_{x2} & 1 & \delta_{z2} + c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อให้ ε_{x2} , ε_{y2} และ ε_{z2} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของกรอบอ้างอิง O_2 δ_{x2} , δ_{y2} และ δ_{z2} คือ ค่า Scale Error และ Straightness Error ที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนของกรอบอ้างอิง O_2 ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันสมการที่ (3.10) จะเป็นดังสมการที่ (3.13)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{T \text{ actual}}^{O_3} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z3} & \varepsilon_{y3} & \delta_{x3} + a_3 \\ \varepsilon_{z3} & 1 & -\varepsilon_{x3} & \delta_{y3} + b_3 \\ -\varepsilon_{y3} & \varepsilon_{x3} & 1 & \delta_{z3} + c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

เมื่อให้ ε_{x3} , ε_{y3} และ ε_{z3} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของกรอบอ้างอิง O_3 δ_{x3} , δ_{y3} และ δ_{z3} คือ ค่า Scale Error และ Straightness Error ที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนของกรอบอ้างอิง O_3 ตามลำดับ

ดังนั้นในความเป็นจริงตำแหน่งที่หัวกัทจะเคลื่อนที่ไปที่จุดตัดเงื่อนไข ดังสมการที่ (3.3) เทียบกับตำแหน่งศูนย์ของเครื่องจักรเป็นดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{T \text{ actual}}^R &= \tilde{\mathbf{T}}_{O_2}^R \tilde{\mathbf{T}}_{O_3 \text{ actual}}^{O_2} \tilde{\mathbf{T}}_{T \text{ actual}}^{O_3} \hat{\mathbf{P}}_T^W \\ \therefore \hat{\mathbf{P}}_{T \text{ actual}}^R &= \begin{bmatrix} a_2 + a_3 + \delta_{x2} + \delta_{x3} + x_{r1} + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) \\ -p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z3}\varepsilon_{z3} - 1) \\ -\varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ b_2 + b_3 + \delta_{y2} + \delta_{y3} + y_{r2} + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) \\ -p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) \\ + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ c_2 + c_3 + \delta_{z2} + \delta_{z3} + z_{r2} + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) \\ -p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) \\ -\varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

และค่าความผิดพลาดในส่วนของหัวกัทขึ้นงานเมื่อเทียบกับจุดศูนย์ของเครื่องจักรจะเป็นดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{spindle} = \hat{\mathbf{P}}_T^R{}_{actual} - \hat{\mathbf{P}}_T^R{}_{ideal}$$

$$= \begin{bmatrix} \delta_{x2} + \delta_{x3} - p_x + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) \\ - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) - \varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{y2} + \delta_{y3} - p_y + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) - p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) \\ - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{z2} + \delta_{z3} - p_z + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) - p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) \\ - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) - \varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

เนื่องจากโครงสร้างของเครื่อง CNC Makino S33 มีการแยกอย่างชัดเจนออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของโต๊ะงาน และส่วนของหัวกัดชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (3.7) บวกกับสมการที่ (3.15) จะได้เป็นสมการค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC Makino S33 ดังสมการที่ (3.16)

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{total} = \begin{bmatrix} \delta_{x1} + \delta_{x2} + \delta_{x3} - p_x + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) \\ + \varepsilon_{y1}p_z - \varepsilon_{z1}p_y - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) - \varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{y1} + \delta_{y2} + \delta_{y3} - p_y + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) - p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) \\ - \varepsilon_{x1}p_z + \varepsilon_{z1}p_x - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{z1} + \delta_{z2} + \delta_{z3} - p_z + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) - p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) \\ + \varepsilon_{x1}p_y - \varepsilon_{y1}p_x - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) - \varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

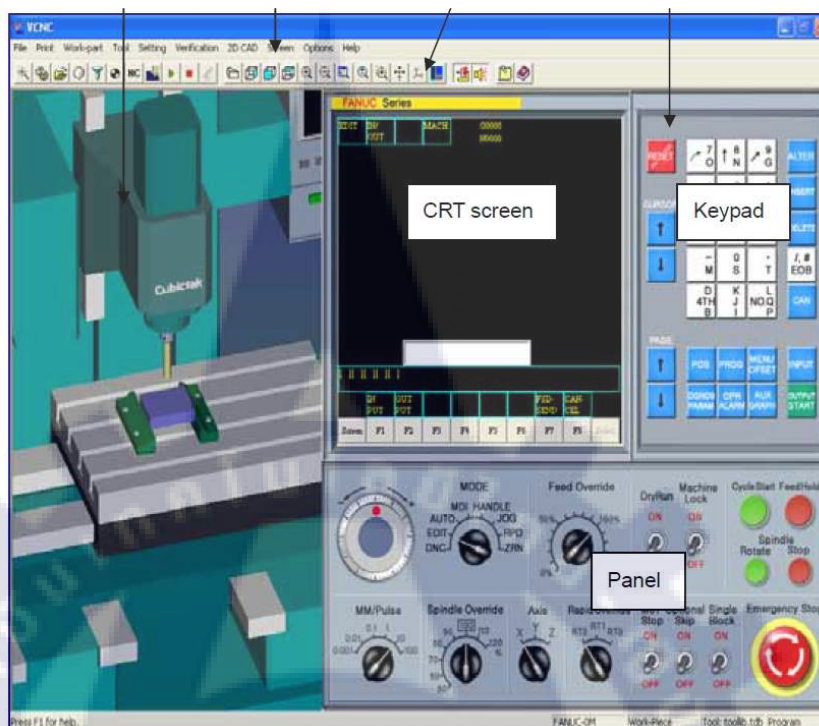
สมการที่ (3.16) นั้นจะถูกนำมาใช้คำนวณค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมีดกัดที่ผิดพลาดไป

3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของ G-Code

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย (NIMT) โดยทาง NIMT ได้ให้ G-code สำหรับการกัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 จึงต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม G-Code เมื่อนำมาใช้กับเครื่องกัด CNC Makino S33

ด้วยโปรแกรม V-CNC ดังรูปที่ 3.3 และเพื่อตรวจสอบเส้นทางการเดินของมีดกัด (Tool Path) ให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน ISO-10791 กำหนด วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อะลูมิเนียม ซีรีย์ 5



รูปที่ 3.3 หน้าโปรแกรม V-CNC ในส่วนของ Machining Center

ที่มา : Cubictek. (2010). **V-CNC Reference Manual**. p. 27.

เนื่องจากในโปรแกรม G-Code ที่ได้รับมาจากสถาบันมาตรวิทยานั้น ในส่วนของการกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 160 mm และการกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (ดังแสดงในภาพผนวก ก. รูปที่ ก-1 และ ก-2) มีเส้นทางการเดินของมีดกัด (Tool Path) ที่ซับซ้อน จึงทำให้เสียเวลาในการกัดขึ้นรูปทรงดังกล่าวมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม G-Code ใน 2 ขั้นตอนการขึ้นรูปดังกล่าว คือ

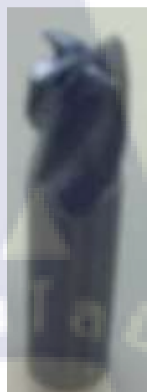
(1) การกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 160 mm : ตรงส่วนเส้นทางการเดินเข้าของเครื่องมือตัด โดยเขียนคำสั่งโปรแกรมย่อยเข้ามาช่วย

(2) การกัดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด : ส่วนของการเดินเข้าของเครื่องมือตัด และในขณะที่ทำการกัดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดให้ได้ขนาด (Finishing)

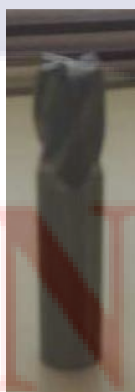
3.2.2 เครื่องมือกัดชิ้นงาน

อุปกรณ์และเครื่องมือกัดสำหรับกัดชิ้นงานมาตรฐานประกอบไปด้วย

- (1) ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ดังรูปที่ 3.4
- (2) ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ดังรูปที่ 3.5
- (3) ดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm



รูปที่ 3.5 ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm



รูปที่ 3.6 ดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm

3.2.3 เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทดสอบ

(1) เครื่อง CMM รุ่น Crysta – Apex Series CNC Coordinate Measuring Machine สำหรับวัดชิ้นงานที่กัดสำเร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง CMM Mitutoyo รุ่น Crysta Apex C 7106

ที่มา : Mitutoyo (Thailand) Co.,Ltd. (2012, February). **Training GEOPAK-WIN.**

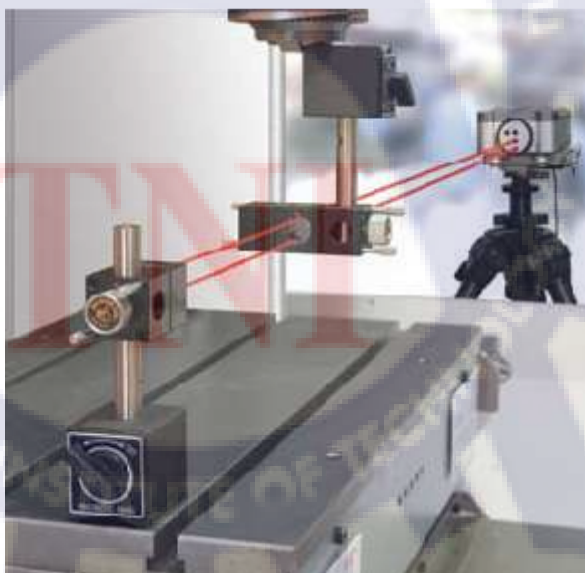
เครื่อง CMM Mitutoyo รุ่น Crysta – Apex C 7106 มีความขีดความสามารถและคุณลักษณะดังนี้

- โครงสร้างเครื่องเป็นแบบสะพาน (Moving Bridge)
- ชุดจับหัววัด หมุนได้ด้วยมอเตอร์ (Probe Head: Motorized Index)
- ความแม่นยำ ตามมาตรฐาน ISO 10360-2, JIS B7440-2
- โปรแกรมประมวลผล Mcosmos V.3.0
- สภาพแวดล้อมในการทำงาน
- ทำงานที่อุณหภูมิ $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ความชื้น 55 - 65 %
- การสั่นสะเทือน 2 micron Peak to Peak
- ค่าความผิดพลาดสูงสุดของหัว Probe (MPE_P) $1.9 \text{ } \mu\text{m}$
- ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเครื่องวัด (MPE_E) $1.9 + 3L/1000 \text{ } \mu\text{m}$

โดยที่ L คือ ระยะทางที่เครื่อง CMM เคลื่อนที่

(2) ชุดเครื่องมือ LIS (Laser Interferometer System, LIS)

ชุดเครื่องมือ LIS ของ Renishaw รุ่น ML 10 ประกอบไปด้วย เครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ และชุดกระจกชนิดต่างๆ สำหรับการวัดพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องมือ LIS ของ Renishaw รุ่น ML 10

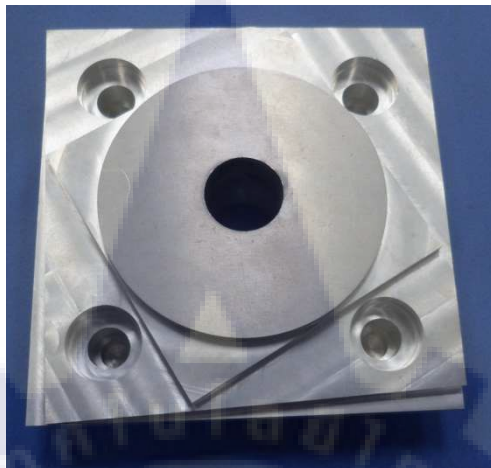
ที่มา: Profex. (2011). **Geometry Machine Tool Calibration Services.** Online.

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การวัดขนาดของชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 โดยใช้เครื่อง CMM

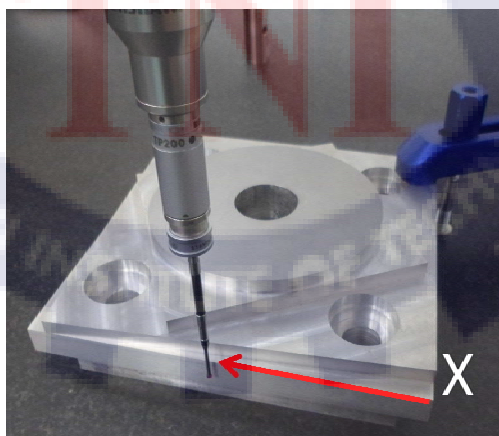
เมื่อกัดขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 เสร็จสิ้น จะได้ชิ้นงานมาตรฐาน ดังรูปที่

3.9

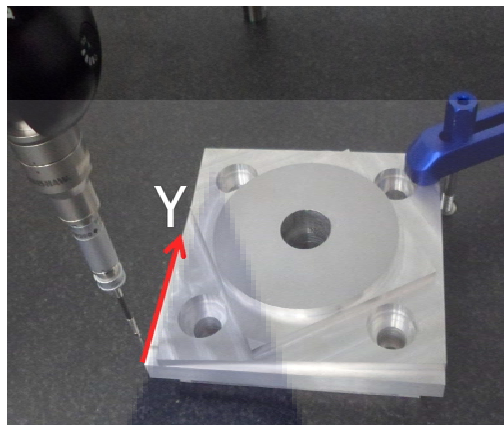


รูปที่ 3.9 ชิ้นงานมาตรฐานที่ขึ้นรูปโดยสมบูรณ์

จากนั้นนำชิ้นงานมาตรฐานมาวัดค่าความตรง (Straightness) ในแนวแกน X และ Y ด้วยเครื่อง CMM โดยขณะที่ทำการวัด เครื่องจะดำเนินการวัดแบบอัตโนมัติทั้งหมด 3 ครั้ง และเก็บค่าคู่ลำดับจำนวน 15 คู่ ในตำแหน่งและทิศทางแนวแกน X และ Y เดียวกันกับการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC Makino S33 ดังรูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.11

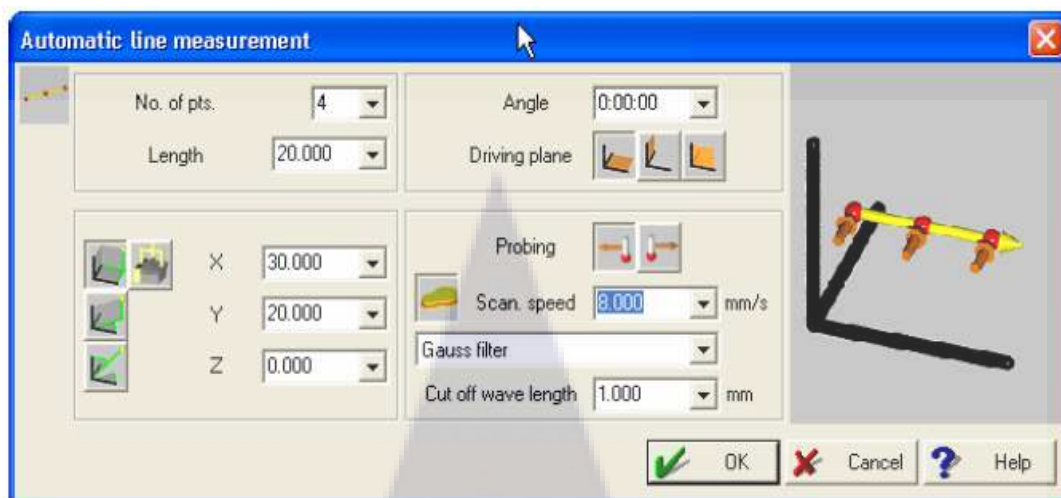


รูปที่ 3.10 ดำเนินการวัด Straightness ในแนวแกน X ด้วย CMM



รูปที่ 3.11 ดำเนินการวัด Straightness ในแนวแกน Y ด้วย CMM

สาเหตุที่ต้องให้เครื่องดำเนินการวัดแบบอัตโนมัติแบบทำซ้ำหลายครั้ง เนื่องจากระหว่างที่ผู้วิจัยทำการทดลองนั้น ได้ทดลองให้เครื่อง CMM ทำการทดสอบการวัด Straightness โดยทำซ้ำแบบอัตโนมัติหลายครั้ง (ประมาณ 5 ครั้งขึ้นไป) จนสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าผลของค่าความตรงที่วัดได้จากเครื่อง CMM จะคงที่เมื่อเครื่องเดินแบบอัตโนมัติประมาณ 2 รอบขึ้นไป มากกว่าขณะที่เครื่องดำเนินการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic Mode) ทั้งนี้จะเป็นเพราะขณะเขียนโปรแกรมการวัด CMM จะต้องเขียนเวกเตอร์บอกทิศทางการแตะของหัว Probe ก่อนทุกครั้งดังรูปที่ 3.12 ดังนั้นเมื่อเครื่องทำงานแบบอัตโนมัติระบบประมวลผลในเครื่องจึงสามารถควบคุมให้หัว Probe แตะผิวชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน ซึ่งส่งผลทำให้ใช้แรงขณะที่หัว Probe แตะชิ้นงานคงที่



รูปที่ 3.12 หน้าโปรแกรมควบคุมทิศทางการวัดของ CMM

ที่มา : Mitutoyo (Thailand) Co.,Ltd. (2005, July). **Geopak-Win Operation**

Function. p.94.

3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลจาก CMM

ข้อมูลที่ได้จากการวัด CMM ทั้ง 3 ครั้ง จะถูกนำมาประมาณค่าในช่วงแบบเส้นตรง (Linear Interpolation) เพื่อหาค่าของจุด X หรือ Y ณ ตำแหน่งเดียวกันกับการวัดค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรด้วยชุดเครื่องมือ LIS และหาค่าเฉลี่ยของจุดพิกัด จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของจุดพิกัดเหล่านั้นมาเขียนแผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) เพื่อคำนวณหาค่าเศษตกค้าง (Residual) ของข้อมูลในแต่ละแนวแกน (Lin. 2001) เนื่องจากค่าเศษตกค้างคือค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลของพิกัดคู่ลำดับในแกน X หรือ Y ซึ่งก็คือค่าความตรงของแต่ละแนวแกนนั่นเอง

3.3.3 การวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร CNC โดยใช้ชุดเครื่องมือ LIS

ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 การจัดวางตำแหน่งกระบอก และลักษณะของกระบอกที่แสงเลเซอร์หักเหผ่านจะสามารถทำให้วัดตัวแปรความผิดพลาด ทั้งการกระจัด (Displacement) และการหมุน (Rotation) ของเครื่องจักรในแต่ละแกน

ในการวัดความคลาดเคลื่อนนั้นจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดแสง เชื่อมต่อกับโปรแกรมประมวลผลของคอมพิวเตอร์, กระบอกแยกลำแสง (Beam Splitter) และกระบอกสะท้อน

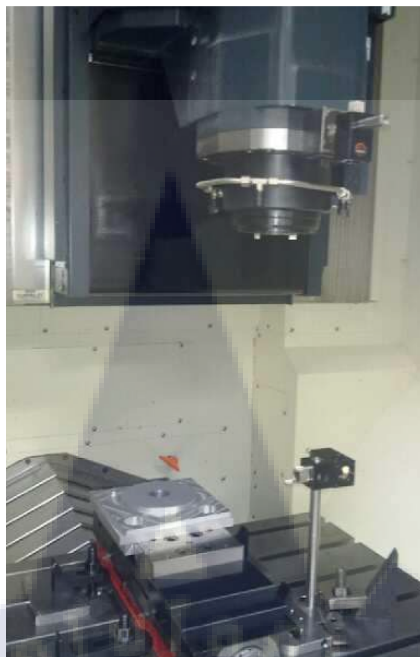
แสง (Retroreflector) ตามรูปที่ 3.13 รูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 ตามลำดับ และการวัดจะกระทำตามกระบวนการตามมาตรฐาน ISO-230 (ดูในภาคผนวก ข. หน้า 63)



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์กำเนิดแสงเลเซอร์



รูปที่ 3.14 ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลของ LIS



รูปที่ 3.15 Beam Splitter และ Retroreflector

เมื่อตรวจวัดค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230 ได้ทั้งหมดแล้ว จึงนำค่าตัวแปรที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดไป (ΔX และ ΔY) ของเครื่องจักรโดยใช้สมการที่ (3.16) จากนั้นทำการวิเคราะห์ในแนวทางเดียวกันกับข้อ 3.3.2 ยกตัวอย่างเช่น จากกระบวนการมาตรฐาน ISO-230 ได้กำหนดให้ทำการวัด 5 ครั้งไปและกลับ ดังนั้นจะได้ผลจากการคำนวณจากสมการที่ (3.16) จากการวัดทั้ง 5 ครั้ง นำข้อมูลทั้ง 5 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ย และเขียนแผนภาพการกระจาย จากนั้นใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาค่าเศษตกค้าง จึงจะได้ค่า Straightness จากการคำนวณ เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่อง CMM เพื่อดำเนินการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลและสรุปผลต่อไป

3.3.4 การสร้างสมการแนวโน้มจากแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่า Straightness ที่วัดได้จาก CMM

สร้างสมการแนวโน้มโดยใช้สมการพหุนามตามความเหมาะสมกับลักษณะของกราฟเศษตกค้าง (Residual) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.16) เพื่อยืนยันว่าค่า Straightness ที่คำนวณได้นั้นสามารถประมาณค่า Straightness จากกระบวนการ ISO-10791 นั้น ได้หรือไม่ และเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองกระบวนการ จากนั้นนำข้อมูลจากการประมาณค่าและจากการคำนวณมาเปรียบเทียบและสรุปผลความเป็นไปได้ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

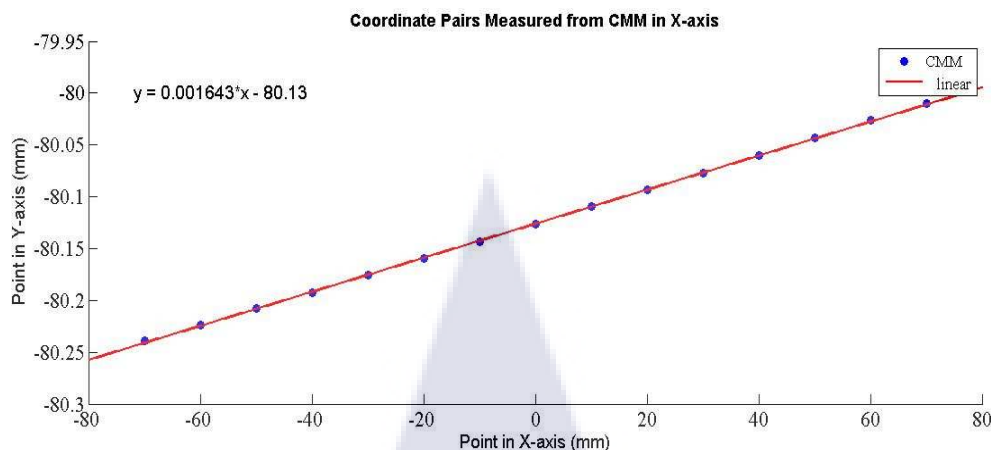
4.1 ค่าความตรง (Straightness) ของเครื่องจักรในแนวแกน X

4.1.1 การวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่อง CMM

การวิเคราะห์ข้อมูลได้ดำเนินการตามข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ค่าตำแหน่งในแนวแกน Y ที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงได้ถูกแสดงไว้ ดังตารางที่ 4.1 และค่าตำแหน่งดังกล่าวได้ถูกใช้ในการสร้างแผนภาพการกระจายที่พล็อตระหว่างจุดในแนวแกน X ที่เครื่องจักรเคลื่อนที่และค่าในแนวแกน Y ที่ได้จากการประมาณค่าในช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

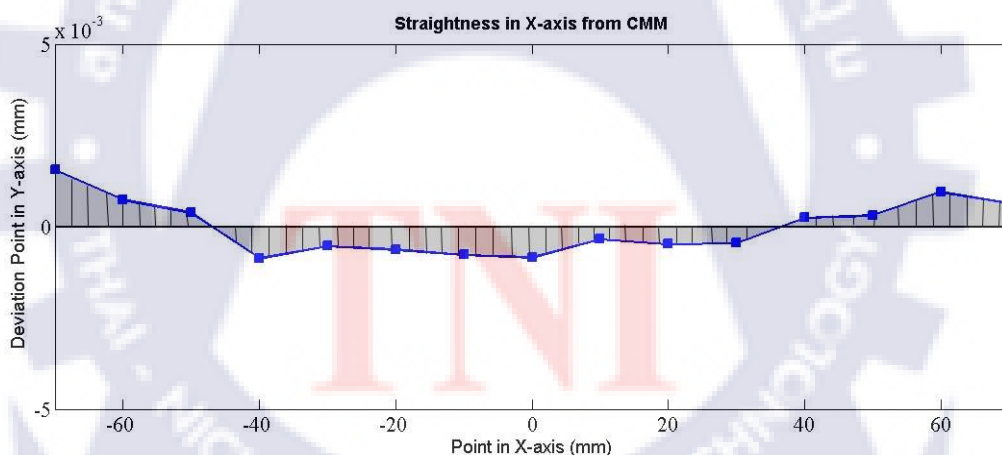
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลจากการวัดด้วย CMM ตามแนวแกน X

จุดพิกัดในแนวแกน X	จุดพิกัดในแนวแกน Y			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
70	-79.9999	-80.031	-79.9996	-80.0102
60	-79.9999	-80.0793	-79.9997	-80.0263
50	-80.0009	-80.1297	-79.9995	-80.0434
40	-80.0006	-80.179	-80	-80.0599
30	-80.0019	-80.2295	-79.9996	-80.077
20	-80.0015	-80.279	-79.9999	-80.0935
10	-80.002	-80.3286	-79.9986	-80.1098
0	-80.0017	-80.3788	-79.9995	-80.1267
-10	-80.0012	-80.429	-79.999	-80.143
-20	-80.0019	-80.4778	-79.9983	-80.1593
-30	-80.001	-80.5277	-79.9983	-80.1757
-40	-80.0017	-80.5777	-79.9979	-80.1924
-50	-80.0002	-80.6257	-79.9968	-80.2076
-60	-79.9999	-80.6748	-79.9963	-80.2237
-70	-79.9985	-80.7245	-79.9949	-80.2393



รูปที่ 4.1 แผนภาพการกระจายของจุดพิกัดในแนวแกน Y จากการวัด Straightness ในแนวแกน X

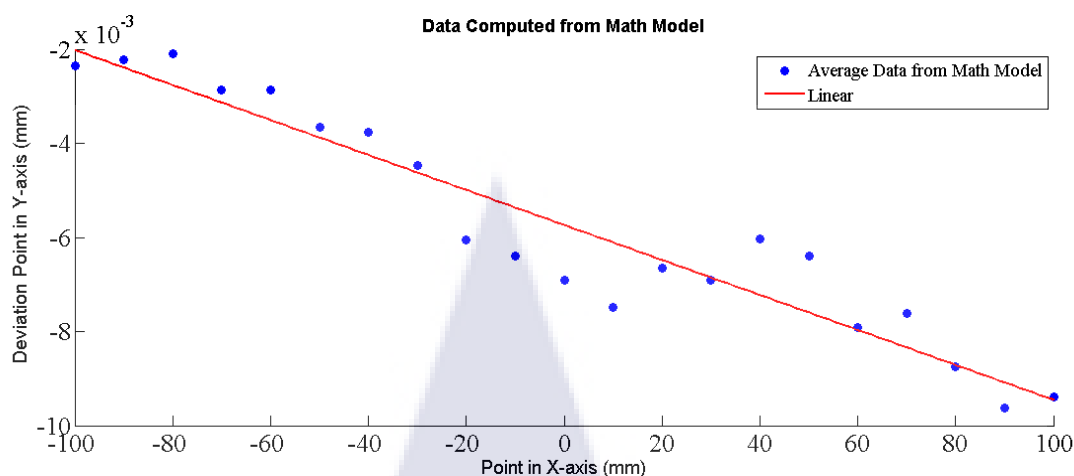
จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงและหาค่าเศษตกค้างในรูปที่ 4.1 ทำให้สามารถหาค่าความตรง (Straightness) ในแนวแกน X ดังกราฟรูปที่ 4.2 ซึ่งตามมาตรฐาน ISO-10791 ได้กำหนดค่าพิกัดความเผื่อในกรณีของ Straightness ไว้ไม่เกิน 0.01 mm



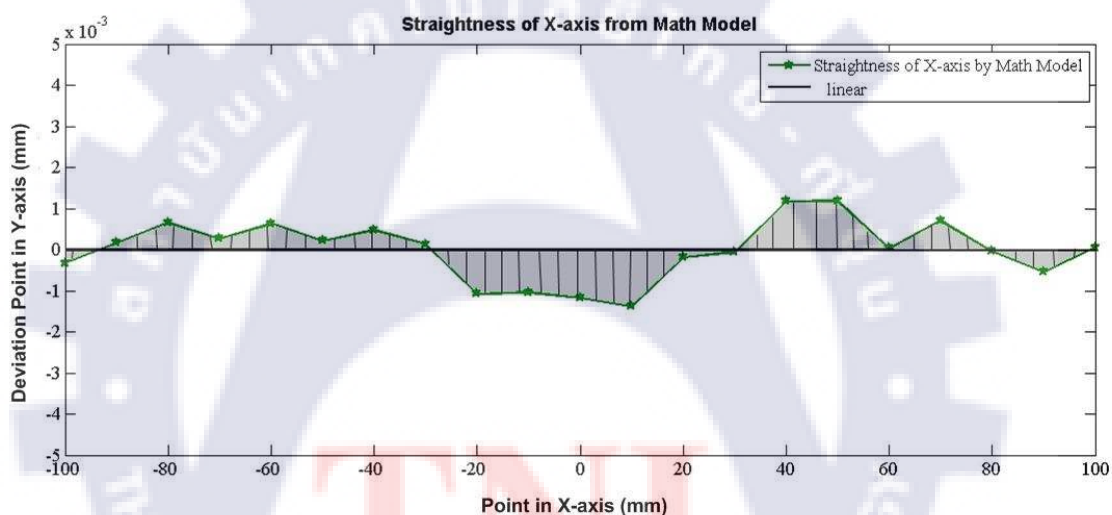
รูปที่ 4.2 ค่า Straightness ของแกน X ที่ได้จากการวัด CMM

4.1.2 การคำนวณค่าความตรง (Straightness) โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

นำค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรที่วัดด้วยชุดเครื่องมือ LIS มาคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.16) จากนั้นนำมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2 จะได้แผนภาพการกระจายของข้อมูลดังรูปที่รูปที่ 4.3 และกราฟ Straightness ในแนวแกน X ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แผนภาพการกระจายของตำแหน่งที่ผิดพลาดในแนวแกน Y ของเครื่องจักร

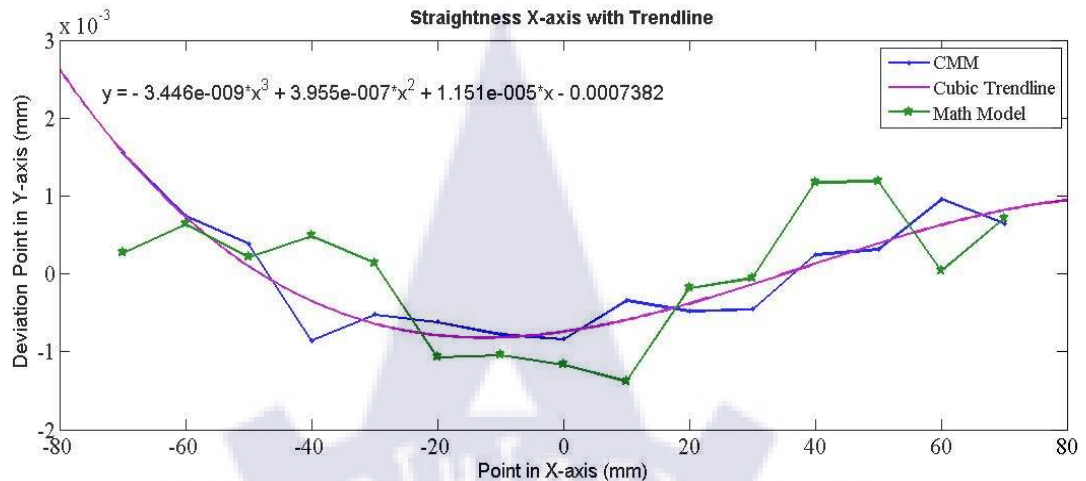


รูปที่ 4.4 ค่า Straightness ของแกน X ที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

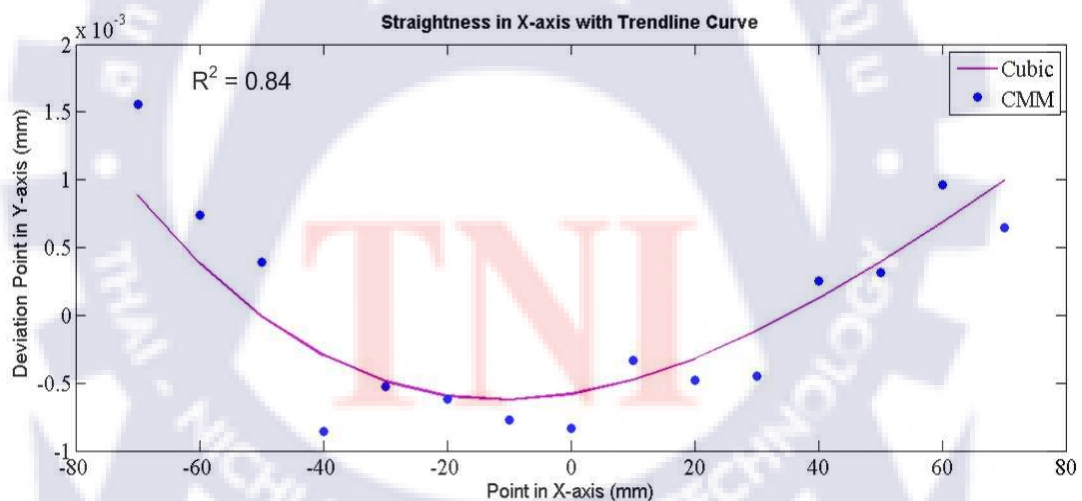
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองในแนวแกน X

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้สร้างสมการแนวโน้มจากแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่า Straightness จากผลการวัดด้วย CMM ตามหัวข้อที่ 3.3.4 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจ (R^2) ถูกใช้เป็นเครื่องมือวัดระดับความสัมพันธ์ของผลการวัด Straightness จากทั้งสองกระบวนการ ซึ่งแสดงผลไว้ใน รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณ Straightness จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการแนวโน้มพหุนามกำลังสาม และผลการวัด Straightness จาก CMM และ รูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจ (R^2)

ระหว่างสมการพหุนามกำลัง 3 ที่สร้างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการวัดด้วย CMM มีค่า $R^2 = 0.84$



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบสมการแนวโน้มพหุนามกำลัง 3, ค่า Straightness จาก CMM และแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.6 สมการแนวโน้มพหุนามกำลัง 3 กับค่า Straightness จาก CMM

จากรูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างสมการพหุนามกำลัง 3 กับข้อมูลจาก CMM นั้นมีค่า $R^2 = 0.84$ ซึ่งในทางสถิตินี้มีความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งสองอยู่ในระดับสูง หรืออาจแปลความหมายได้ว่า ถ้าแทนค่าตำแหน่งในแนวแกน X ของเครื่องจักร Makino S33 ในสมการพหุนามกำลัง 3 ที่ได้จากการประมาณค่า Straightness จากการคำนวณโดยใช้สมการที่

(3.16) จะสามารถทำนายค่า Straightness จากการวัด CMM ได้ถูกต้อง 84% (ชูศรี วรรัตน์. 2541)

เมื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยการทดสอบค่าที (t-test) เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีจำนวนน้อยกว่า 30 จำนวน ทำให้พบว่าสมการแนวโน้มพหุนามกำลัง 3 ที่สร้างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสัมพันธ์กับค่า Straightness ที่วัดได้จาก CMM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

4.3 ค่าความตรง (Straightness) ของเครื่องจักรในแนวแกน Y

4.3.1 การวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่อง CMM

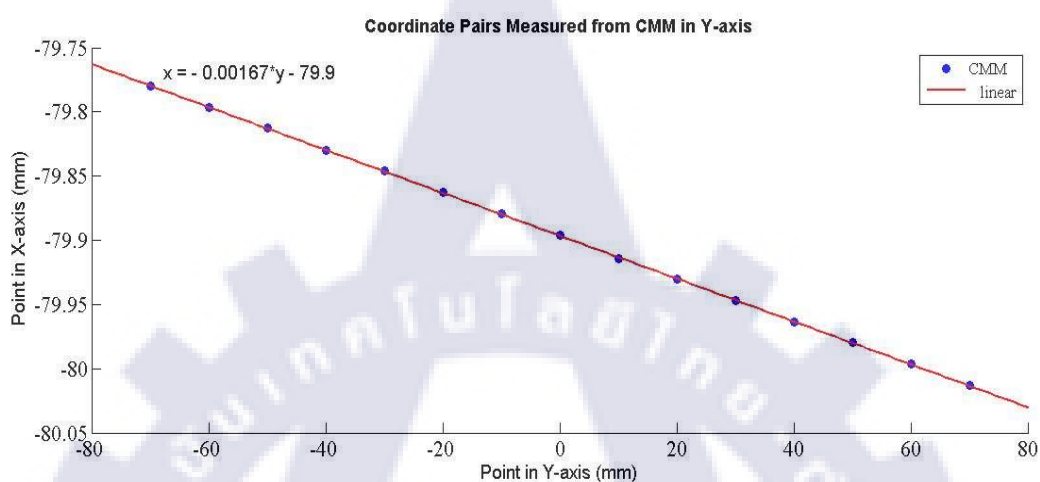
ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดด้วย CMM ดังหัวข้อที่ 3.3.2 ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพิกัดในแนวแกน X ที่ได้จากการประมาณค่าในช่วง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงมาพล็อตแผนภาพการกระจายเพื่อทำการคำนวณหาค่าเศษตกค้าง (Residual) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง และพล็อตกราฟค่าความตรงในแนวแกน Y ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลดิบจากการวัด CMM ตามแนวแกน Y

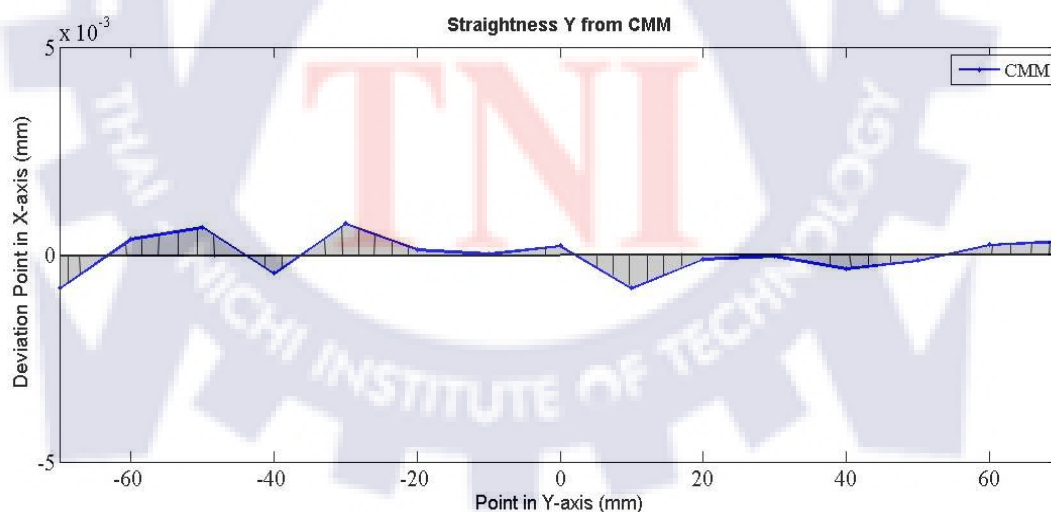
จุดพิกัดในแนวแกน X	จุดพิกัดในแนวแกน Y			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
70	-79.9413	-80.0517	-80.0463	-80.0131
60	-79.8915	-80.0516	-80.0453	-79.9961
50	-79.842	-80.0525	-80.0447	-79.9797
40	-79.7923	-80.0528	-80.0452	-79.9634
30	-79.7421	-80.0532	-80.0454	-79.9469
20	-79.6923	-80.0531	-80.0446	-79.9300
10	-79.6431	-80.0538	-80.0449	-79.9139
0	-79.5922	-80.0529	-80.0438	-79.8963
-10	-79.5425	-80.0536	-80.0429	-79.8797
-20	-79.4925	-80.0535	-80.0424	-79.8628
-30	-79.442	-80.0529	-80.0427	-79.8459
-40	-79.3933	-80.0533	-80.0426	-79.8297
-50	-79.3423	-80.0526	-80.0421	-79.8123

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลดิบจากการวัด CMM ตามแนวแกน Y (ต่อ)

จุดพิกัดในแนวแกน X	จุดพิกัดในแนวแกน Y			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4
-60	-79.2927	-80.0537	-80.0425	-79.7963
-70	-79.244	-80.0536	-80.0419	-79.7798



รูปที่ 4.7 แผนภาพการกระจายของจุดพิกัดในแนวแกน X จากการวัด Straightness ในแนวแกน Y

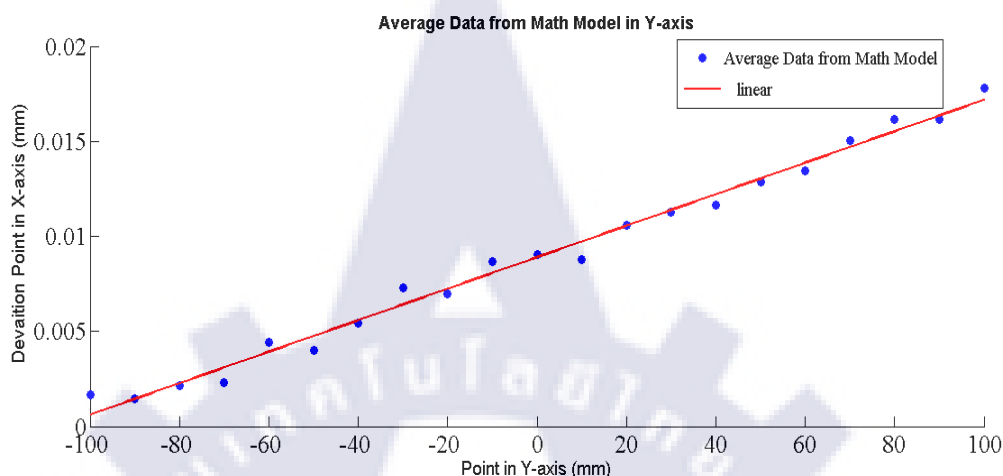


รูปที่ 4.8 ค่าความตรง (Straightness) ของแกน Y ที่ได้จากการวัด CMM

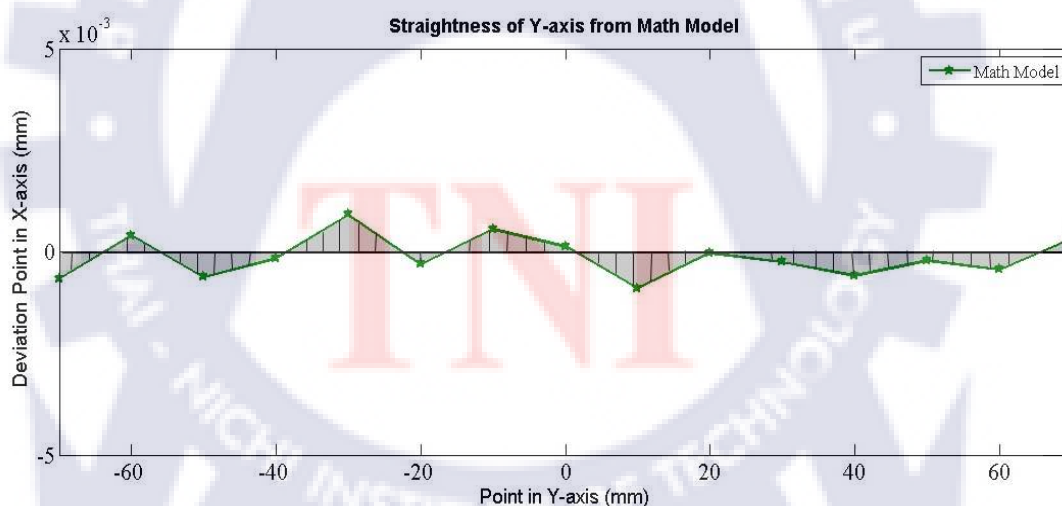
จากรูปที่ 4.8 ตามมาตรฐาน ISO-10791 ได้กำหนดค่าความเผื่อไม่เกิน 0.01 mm

4.3.2 การคำนวณค่าความตรง (Straightness) โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากการคำนวณ โดยทำตามข้อ 3.3.2 สามารถเขียนแผนภาพการกระจายได้ดังรูปที่ 4.9 ทำการคำนวณค่าความตรง (Straightness) โดยใช้สมการที่ (3.16) เหมือนที่กระทำในแกน X แล้วนำมาพล็อตกราฟความตรงของแนวแกน Y ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 แผนภาพการกระจายของตำแหน่งที่ผิดพลาดในแนวแกน Y ของเครื่องจักร

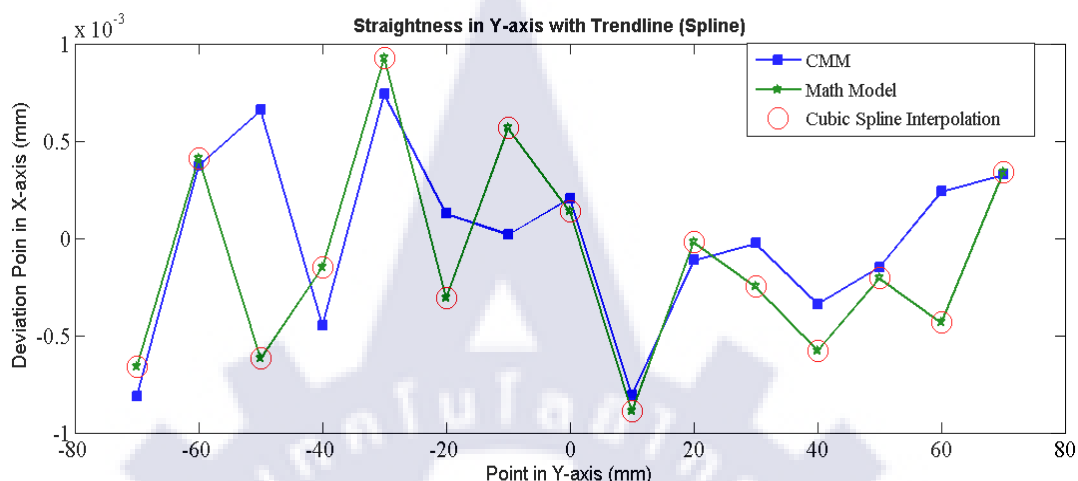


รูปที่ 4.10 ค่าความตรง (Straightness) ของแกน Y ที่คำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

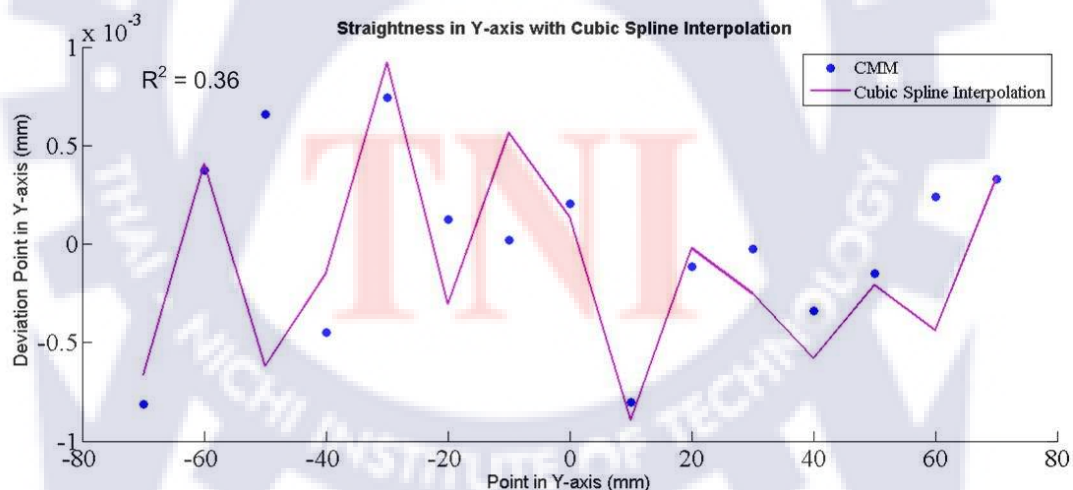
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองในแนวแกน Y

สมการแนวโน้มได้ถูกสร้างขึ้นจากผลการคำนวณค่า Straightness จากสมการที่ (3.16) เพื่อทำนายผลการวัด Straightness ด้วย CMM รูปที่ 4.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบ

ระหว่าง Straightness ที่คำนวณได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์, การวัด CMM และ เส้นสมการแนวโน้ม และรูปที่ 4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่างสมการแนวโน้มกับค่า Straightness ที่วัดจาก CMM



รูปที่ 4.11 การประมาณค่าโดยใช้ฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline), ค่า Straightness จาก CMM และ แบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.12 ฟังก์ชันเหมือนพหุนาม (Spline) กับค่า Straightness จาก CMM

จากรูปที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าอยู่ที่ $R^2 = 0.36$ แสดงว่าความสัมพันธ์ของค่า Straightness ที่วัดจาก CMM กับ การใช้ฟังก์ชันเหมือนพหุนามหรือการประมาณค่าแบบ Spline เป็นสมการแนวโน้มจาก Straightness ที่ถูกคำนวณด้วยสมการที่

(3.16) มีความสัมพันธ์ระดับปานกลาง หรือสามารถกล่าวได้ว่า ถ้าแทนค่าจุดพิกัดในแนวแกน Y โดยใช้ฟังก์ชันเส้นมือนพหุนาม (Spline) ที่ถูกสร้างขึ้นจากค่า Straightness ที่คำนวณจากสมการที่ (3.16) จะสามารถทำนายค่า Straightness ที่ได้จาก CMM ถูกต้อง 35%

เมื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของข้อมูลทั้งสอง โดยใช้การทดสอบค่าที (t-test) พบว่าฟังก์ชันเส้นมือนพหุนาม (Spline) ที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสัมพันธ์กับค่า Straightness ที่วัดได้จาก CMM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 สรุปชนิดของสมการแนวโน้มนำที่ใช้ประมาณค่า Straightness จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการที่ (3.16)) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการแนวโน้มนำกับค่า Straightness ที่วัดโดย CMM

ตารางที่ 5.1 สรุปชนิดสมการแนวโน้มนำจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

ทิศทางการวัด Straightness จาก CMM	ชนิดสมการแนวโน้มนำ	ค่าสัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ
แกน X	พหุนามกำลัง 3	0.84
แกน Y	ฟังก์ชันเส้นเหมือนพหุนาม (Spline)	0.36

พิจารณาตารางที่ 5.1 สามารถสรุปผลการทดลองจำแนกเป็นข้อๆได้ดังนี้

5.1.1 ในแนวแกน X มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ระดับสูง ($R^2 = 0.84$) หรืออาจแปลความหมายได้ว่า Straightness ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้สมการพหุนามกำลัง 3 นั้น สามารถทำนายค่า Straightness ที่วัดจาก CMM ถูกต้อง 84% ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% โดยสาเหตุที่เลือกใช้สมการพหุนามกำลัง 3 นั้น เนื่องจากสมการพหุนามกำลัง 3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการพหุนามกำลังอื่นๆ ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าสมการพหุนามกำลัง 3 เหมาะสมที่จะใช้เป็นสมการประมาณค่า Straightness จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร Makino S33 ที่ให้ผลใกล้เคียงกันกับการวัด Straightness ด้วย CMM ได้เป็นอย่างดี

5.1.2 ในแนวแกน Y มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ระดับปานกลาง ($R^2 = 0.36$) หรืออาจแปลความหมายได้ว่า Straightness ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามเส้นเหมือน (Spline) นั้น สามารถทำนายค่า Straightness ที่วัดจาก CMM ถูกต้อง 36% ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% เหตุผลที่เลือกฟังก์ชันพหุนามเส้นเหมือนนั้น มีเหตุผลเช่นเดียวกันกับแกน X ถึงแม้ว่าฟังก์ชันพหุนามเส้นเหมือนนั้นจะเป็นการสร้างสมการพหุนามในแต่ละช่วงย่อยๆ (Spline) ทำให้สมการประมาณค่ามีความใกล้เคียงกับ Straightness จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แต่เนื่องจากทั้งข้อมูลของ Straightness ที่วัดได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และ

การวัด CMM มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่แตกต่างกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลที่ได้จากการวัด CMM มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.0016 0.0004 และ 0.0005 mm ในการวัดครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันข้อมูลที่ได้จากการวัด Straightness ในแนวแกน X มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 0.0009 0.0007 และ 0.0007 mm ในการวัดครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าข้อมูล Straightness ในแนวแกน Y มีการกระจายตัวสูง อย่างไรก็ตามข้อมูลดังกล่าวยังไม่เกินช่วงความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของเครื่อง CMM และหัว Probe ชนิด TP 200 ($1.9\ \mu\text{m}$) ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.3 เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทดสอบ

5.1.3 จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่คำนวณได้จากทั้งสองแนวแกน ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัด มีอิทธิพลต่อ Straightness Error Parameters และลักษณะผิวชิ้นงาน ในระดับความเชื่อมั่นที่ 90%

5.1.4 นอกจากตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรที่ส่งผลต่อ ลักษณะผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัดขึ้นรูปแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อลักษณะผิวชิ้นงานอีก เช่น การความผิดพลาดเนื่องจากการหมุนของ Spindle และอื่นๆ จากผลงานวิจัยของ Choi ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้รวมเอาความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของ Spindle เข้าไปด้วยพบว่า การรวมความผิดพลาดเชิงมุมที่เกิดจากการหมุนของ Spindle เข้าไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์ทำให้สามารถทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมในชิ้นงานจริงผิดพลาดเพียงแค่ 10% (Choi; et al. 2002)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อให้สามารถเห็นผลกระทบที่ชัดเจนกว่าที่ปรากฏในการทดลองนี้ ควรทำการทดลองในรูปแบบเดียวกันกับเครื่องจักรที่มีการใช้งานมานานกว่านี้ เช่นเป็นเครื่องที่มีการใช้งานการผลิตในอุตสาหกรรมประมาณ 3-5 ปี และมีค่าตำแหน่งความผิดพลาดมากกว่า $20\ \mu\text{m}$

5.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัด ได้แก่ Scale และ Straightness Error เพราะถ้าขาดค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งไปในแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะทำให้ค่า Straightness ที่คำนวณได้ผิดพลาดไปอย่างมาก ในขณะที่ตัวแปรความผิดพลาดเนื่องจากมุมทั้ง Pitch และ Yaw มีอิทธิพลต่อลักษณะผิวชิ้นงานและลักษณะการเคลื่อนที่ของมีดกัดน้อย เนื่องจากค่าเฉลี่ยของทั้งสองตัวแปรความผิดพลาดอยู่ที่ 3 nm และ 11 nm ในแนวแกน X และ ในแนวแกน Y มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 5 nm และ 8.5 nm ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาเพื่อต่อยอดงานวิจัยนี้ในอนาคต อาจไม่จำเป็นต้องพิจารณาตัวแปร Pitch และ Yaw Errors

5.2.3 ควรกำหนดระดับความเชื่อมั่นของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเดินของมีดกัดและผลลัพธ์ของผิวชิ้นงานในการศึกษาต่อไปไว้ที่ 90%

5.2.4 การวัดค่าความไม่สมบูรณ์ของขนาดความกลม (Roundness) ของมีด และการ
สายตัวของมีดเนื่องจากการหมุนที่ไม่กลมของหัวจับมีด และนำค่าไปคำนวณร่วมกับแบบจำลอง
คณิตศาสตร์ของความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ชูศรี วงศ์รัตนะ. (2544). **เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : เทพเนรมิตการพิมพ์.
- วราคม เน็ดน้อย. **การปรับเทียบเครื่องจักร CNC**. สืบค้นเมื่อ 31 กรกฎาคม 2554, จาก http://www.eng.mut.ac.th/upload_file/article/111.pdf
- สายชล สันสมบุรณ์ทอง. (2551). **สถิติวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จามจุรีโปรดักท์.
- Arotech Co.,Ltd. (2011). **Laser Interferometer Implementation**. Retrieved April 9, 2012, from <http://www.aerotech.com/products/engref/intexe.html>
- Chen G.; Yuan J; and Ni J. (2000, June). A Displacement Measurement Approach for Machine Geometric Assessment. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. (41) : 149-153.
- Choi J.P.; Lee S.J.; and Kwon H.D. (2002, April). Roundness Error Prediction with a Volumetric Error Model Including Spindle Error Motions of a Machine Tool. **The International Journal of Advance Manufacturing Technology**. (21) : 923-928.
- Choi J.P.; Min B.K.; and Lee S.J. (2004, July). Reduction of Machining Errors of a Three-Axis Machine Tool by On-Machine Measurement and Error Compensation System. **Journal of Materials Processing Technology**. (155) : 2,057-2,060.
- Cubicek Co.,Ltd. (2010). **V-CNC Reference Manual**. Seoul, South Korea : Cubicek.
- Ehmann K.F.; Wu B.T.; and Devries M.F. (1987, January). A Generalized Geometric Error Model for Multi-axis Machines. **CIRP Annals – Journal of Manufacturing and Technology**. (36) : 253-256.
- Ferreira P.M.; and Liu C.R. (1993). A Method for Estimating and Compensating Quasistatic Errors of Machine Tools. **Transaction of the ASME Journal of Engineering for Industry**. (115) : 149-159.
- ISO 230-1. (1996). **Test Code for Machine Tools-Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-Load of Finishing Condition**. Genève, Switzerland : International Organization for Standardization.

- ISO 10791-7. (1998). **Test Conditions for Machining Centres – Part 7 : Accuracy of a Finished Test Piece.** Genève, Switzerland : International Organization for Standardization.
- Kay Jennifer. (2005). **Introduction to Homogeneous Transformations & Robot Kinematics.** Retrieved July 27, 2011, from <http://elvis.rowan.edu/~kay/papers/kinematics.pdf>
- Lee Kunwoo. (1999). **Principles of CAD/CAM/CAE Systems.** Singapore : Pearson.
- Lin Shyh-Tsong. (2001, February). A Laser Interferometer for Measuring Straightness. **Optics & Laser Technology.** (33) : 195-199.
- Makino Co., Ltd. (2007, February). **Vertical Machining Center S-Series Installation Manual.** Tokyo, Japan : Makino Co., Ltd.
- Mitutoyo (Thailand) Co.,Ltd. (2005, July). **Geopak–Win Operation Function.** Bangkok, Thailand : TSD Department, Mitutoyo (Thailand) Co.,Ltd.
- (2012, February). **Training GEOPAK-WIN.** Bangkok, Thailand : TSD Department, Mitutoyo (Thailand) Co.,Ltd.
- Okafor A.C.; and Ertekin M. Yalcin. (1999, November). Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center Using Rigid Body Kinematics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** (40) : 1,200-1,204.
- Peter Bersbach. (2012). **Scatter Plot for Visualization of Relationship.** Retrieved February 14, 2013, from <http://www.sixsigmatrainingconsulting.com>
- Propex Co.,Ltd. (2011). **Geometry Machine Tool Calibration Services.** Retrieved February 14, 2013, from http://www.profxdca.sk/?page_id=87&lang=en
- Raksiri Chana; and Parnichkun Manukid. (2004, April). Geometric and Force Errors Compensation in a 3-axis CNC Milling Machine. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** (44) : 1,283-1,285.
- Renishaw Co.,Ltd. (2001, August). **Straightness Measurement User Guide.** Issue 5.1. Retrieved January 24, 2013, from <http://jitaruaugustin.files.wordpress.com/2010/01/rectilinitate.pdf>.
- Reshetov, Dmitri; and Portman, Vladimir. (1986). **Accuracy of Machine Tools.** Translation by J.I. Ghojel. New York : The American Society of Mechanical Engineers.

- Rossini Jeffrey. (2010). **Infrared Spectroscopy**. Retrieved April 9, 2012. from http://chemwiki.ucdavis.edu/Wikitexts/UCD_Chem_115/Chemwiki_Module_Topics/How_an_FTIR_instrument_works/FTIR:_Hardware
- Warakom Nerdnoi. (1999). **3D Laser Interferometer Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration**. Dissertation, Ph.D. (Manufacturing Engineering). Coventry : Graduate School, Coventry University.
- Weck, Manfred. (1980). **Metrological Analysis and Performance Tests**. Translation by H. Bibring. Toronto, Canada : Wiley Heyden Ltd.
- Zhu Shaowei; et al. (2011, August). Integrated Geometric Error Modeling, Identification and Compensation of CNC Machine Tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. (52) : 24-29.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
การดำเนินงานตามมาตรฐาน ISO-10791



ก-1 มาตรฐาน ISO-10791 ส่วนที่ 7 ในการทดสอบเครื่องจักร CNC

มาตรฐาน ISO-10791 เป็นมาตรฐานที่สร้างขึ้นในการทดสอบเครื่องจักร CNC แบบ 3 แกนขึ้นไป ซึ่งแบ่งส่วนที่ทดสอบออกเป็น 12 ส่วน โดยแต่ละส่วนก็จะเป็นแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ทดสอบเครื่องจักร CNC เช่น ส่วนที่ 6 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราการใช้ความเร็ว และการเดินของเครื่องมือ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการจะหาค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรเท่านั้น จึงทดสอบเฉพาะในส่วนที่ 7 ซึ่งเป็นการทดสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่กัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว (Accuracy of a Finished Test Piece)

ในส่วนที่ 7 นั้นได้อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 1 ในเรื่องของการตรวจสอบ ชิ้นงานที่กัดเสร็จสมบูรณ์, วัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานตลอดจนถึงขนาดของชิ้นงานทดสอบ โดยมาตรฐานนี้มีเป้าหมายที่จะทดสอบคุณลักษณะของเครื่องจักรดังนี้

- 1) ความถูกต้องของตำแหน่ง (Position Accuracy) และการเดินซ้ำ (Repeatability) ของเครื่องจักรในแกน X, Y และ Z
- 2) การโก่งงอของชิ้นส่วนเครื่องจักรภายใต้สภาวะการตัดเฉือน
- 3) ความตึงฉากของแกน X และ Y ของเครื่องจักร
- 4) ความสามารถในการเดินเป็นวงกลมของเครื่องจักรในระนาบ X-Y

ขนาดชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ทดสอบนั้นจะมี 2 ประเภท ซึ่งขนาดของชิ้นงาน และจุดประสงค์ในการทดสอบก็จะแตกต่างกันไปอีก ดังตารางที่ ก-1

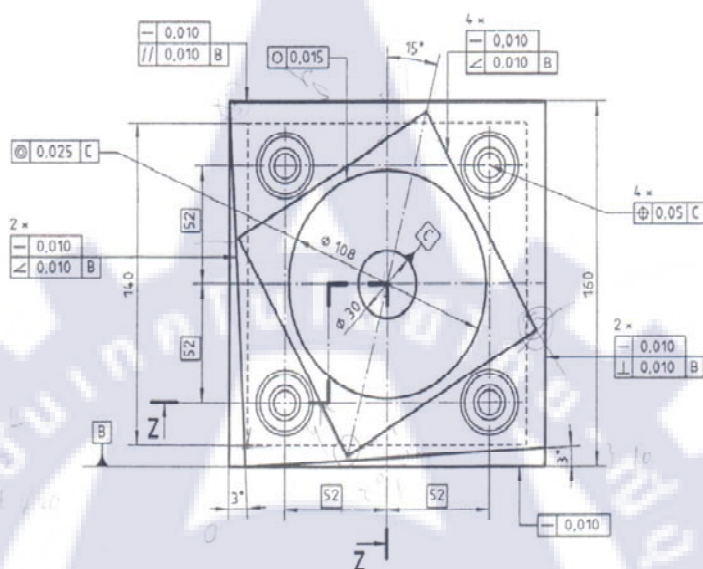
ตารางที่ ก-1 แสดงประเภท, ขนาด และมาตรฐานที่กำหนดในการทดสอบชิ้นงาน

ประเภท	ขนาดชิ้นงาน (mm)	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
A (ทดสอบตำแหน่งและการเดินผิวเส้นโค้ง)	160	ISO-10791-7-A160
	320	ISO-10791-7-A320
B (ทดสอบการปาดหน้า)	80	ISO-10791-7-B80
	60	ISO-10791-7-B160

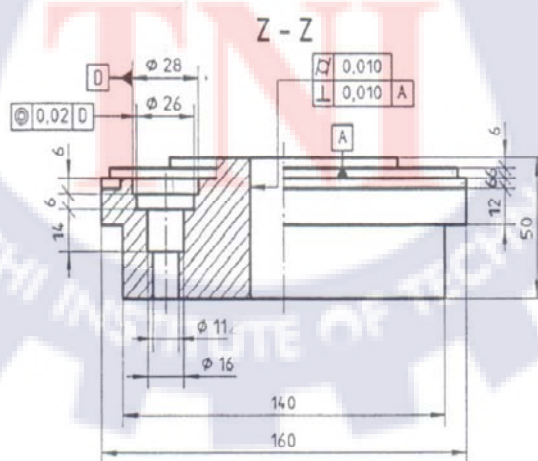
ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบชิ้นงานมาตรฐานประเภท A ซึ่งจะมีการทดสอบตำแหน่ง โดย การเจาะรูทั้งหมด 5 รู ในขนาดที่แตกต่างกัน และเพื่อที่จะตรวจสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแบบหลากหลายเงื่อนไข เช่น การเดินเส้นตรงและการเดินเป็นวงกลม ซึ่งแบบงานของชิ้นงานมาตรฐานดังกล่าวจะได้แสดงดังรูปที่ ก-1 และ รูปที่ ก-2

ก-2 ขั้นตอนการกั้ดขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791

ทำการประกอบเครื่องมือตัดบนชุดเปลี่ยนเครื่องมือของเครื่องกัด CNC ให้ตรงกับการใช้งานของโปรแกรม G-Code ที่เขียนไว้ โดยที่ดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ให้ประกอบไว้ที่เบอร์ T2, ดอกกัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ให้ไว้ประกอบที่เบอร์ T3 และดอกกัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ให้ประกอบไว้ที่เบอร์ T4

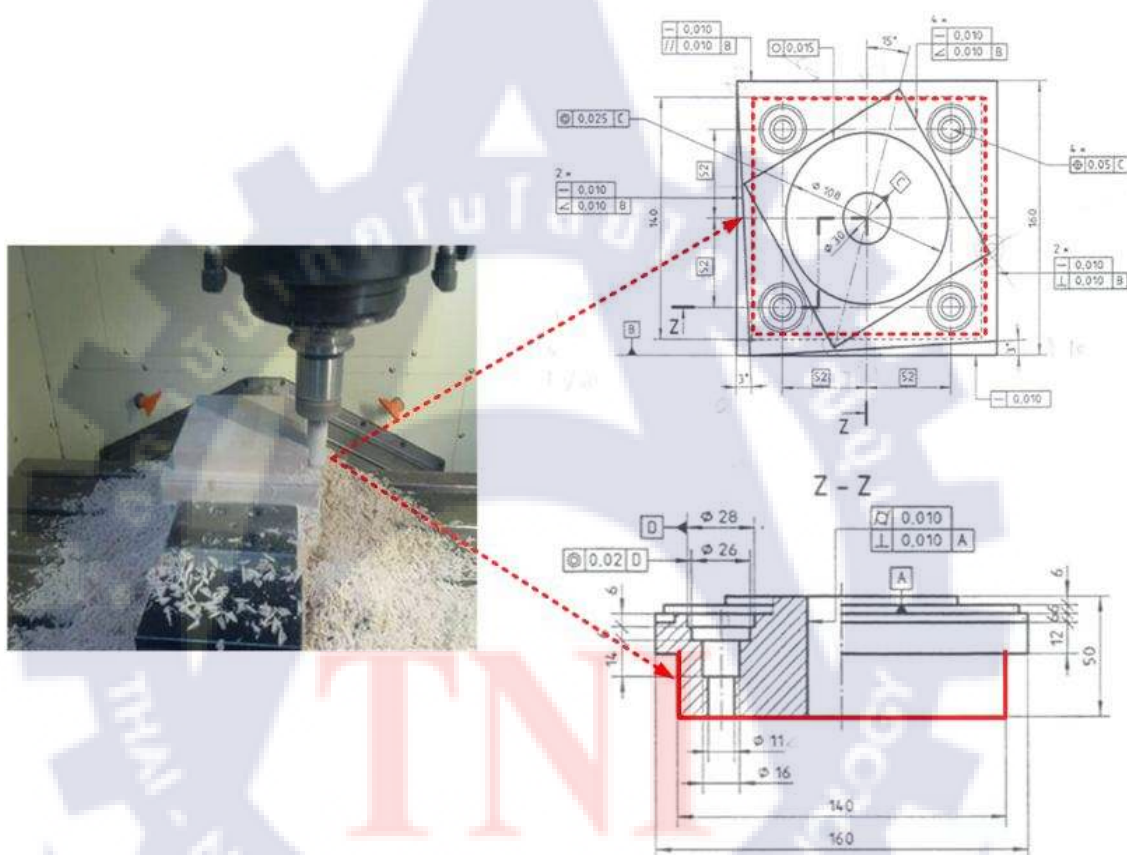


รูปที่ ก-1 มุมมองด้านบนของชิ้นงานมาตรฐาน



รูปที่ ก-2 ภาพตัดด้าน Z-Z

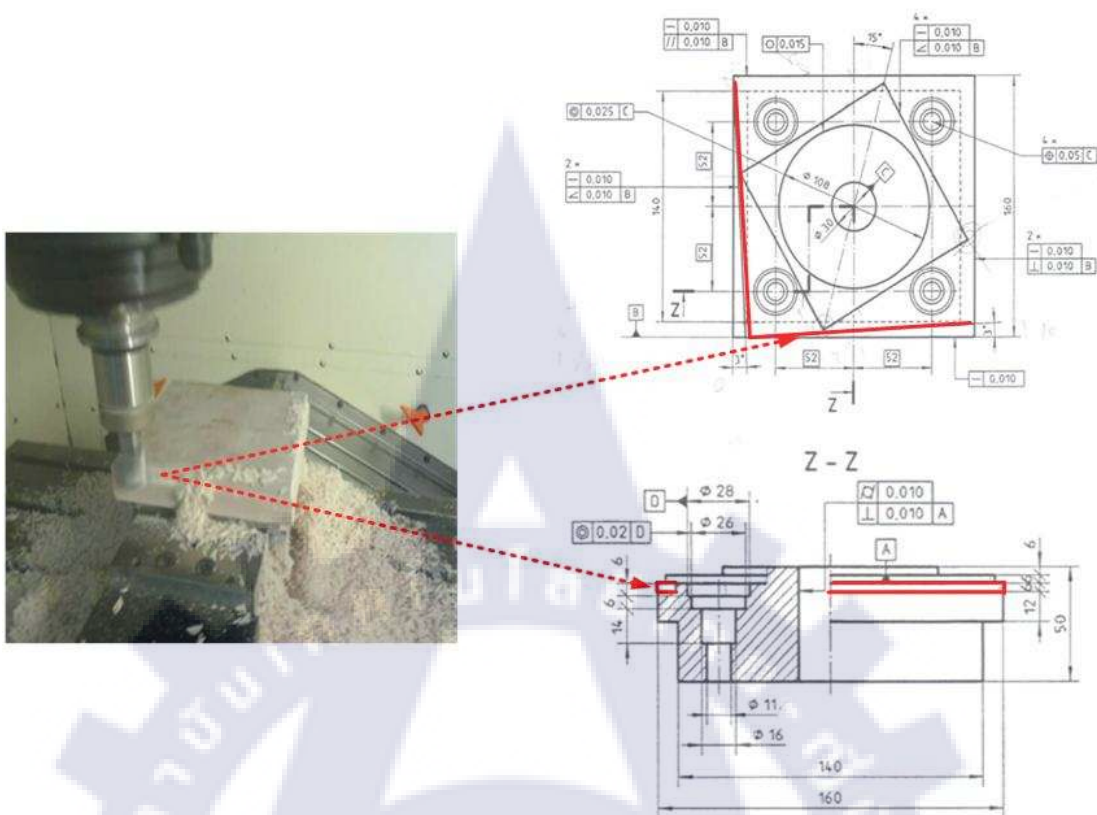
ตามแบบชิ้นงานรูปที่ ก-1 และ รูปที่ ก-2 จะเห็นว่าศูนย์กลางของชิ้นงานอยู่ที่ วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ตรงกลางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 160 mm และจะต้องร่วม ศูนย์กลางกับวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 mm อีกด้วย ดังนั้นในขั้นตอนแรกจะดำเนินการกัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 140 mm เสียก่อน เนื่องจากไม่ต้องการความร่วมศูนย์กลาง และไม่เป็ น ระบายอ้างอิงที่ใช้ในการวัดขนาด ซึ่งการกัดชิ้นงานที่ดีนั้น ควรจะให้ดอกกัดเริ่มเดินเข้าหา ชิ้นงานตรงตำแหน่งมุมของชิ้นงาน ดังรูปที่ ก- 3 และไม่ควรนำดอกกัดลงมาสัมผัสที่จุดกึ่งกลาง หรือเนื้อวัสดุทันที เพราะจะทำให้ดอกกัดสึกเร็ว



รูปที่ ก- 3 แสดงการกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 140 mm

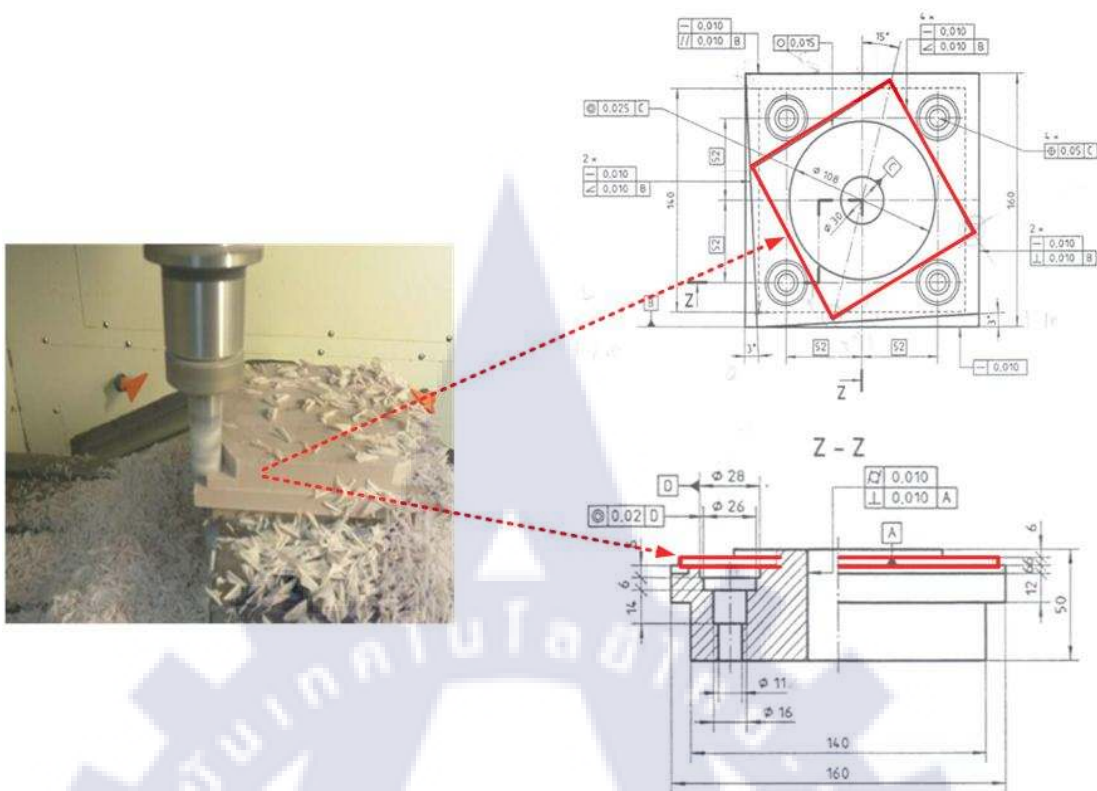
หลังจากทำการกัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 140 mm แล้วจึงทำการพลิกชิ้นงานและกัดขึ้น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 160 mm จากนั้นทำการขึ้นรูปตามลำดับการกินลึก (จากมากไปหาน้อย) ของชิ้นงานโดยใช้ดอกกัด End mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ดังต่อไปนี้

(1) เมื่อกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 160 mm แล้วจึงทำการกัดมุมเอียง 3° กับแนว ระบาย โดยจะเริ่มกินเนื้องานจากขอบด้านมุมซ้ายดังรูปที่ ก-4



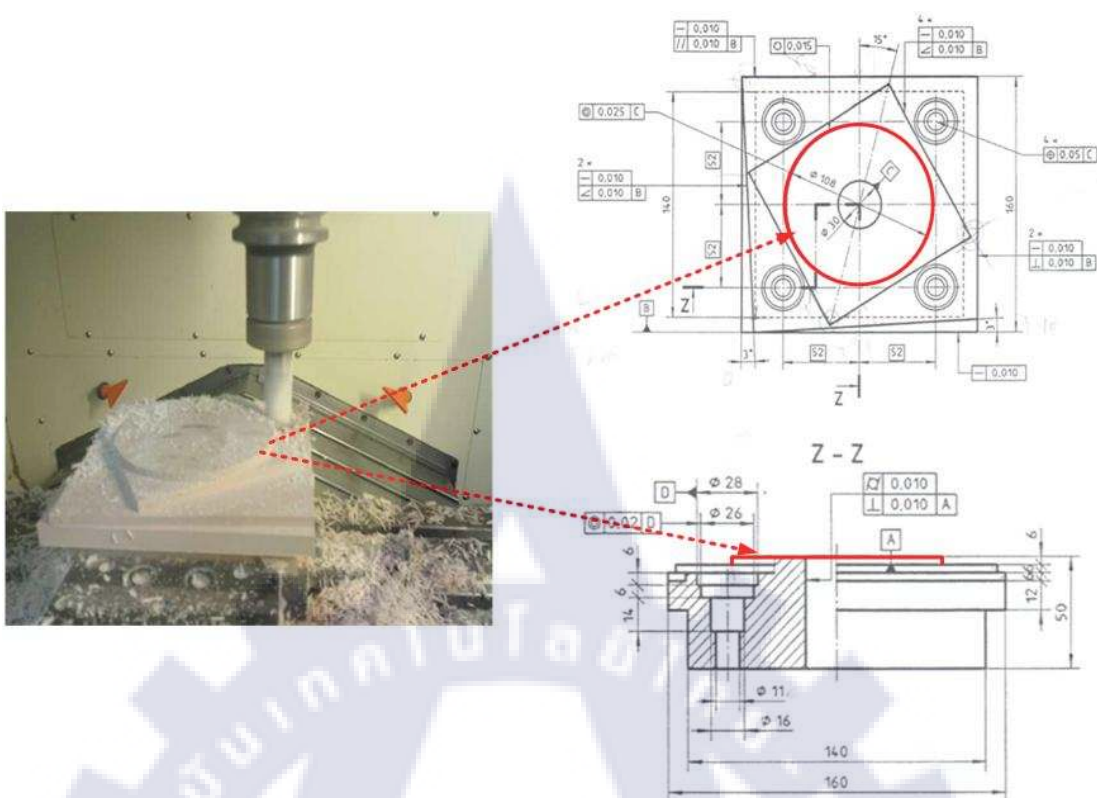
รูปที่ ก-4 แสดงการกัดมุมเอียง 3°

(2) หลังจากนั้นจึงกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด โดยจะค่อยๆ กินเนื้องานตรงบริเวณมุมทั้ง 4 ด้าน จนได้รูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดจากนั้นจึงกัดผิวเรียบ (Finishing) ดังรูปที่ ก-5



รูปที่ ก-5 แสดงการกัดขึ้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด

(3) ทำการกัดขึ้นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 mm ที่มีศูนย์กลางตรงกึ่งกลาง
ชิ้นงานดังรูปที่ ก-6



รูปที่ ก-6 การกัดขึ้นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 mm

(4) เจาะรูทะลุเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ด้วยดอกสว่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm ที่มุมทั้งสองด้าน และที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน เพื่อเป็นการเจาะนำศูนย์กลาง จากนั้นเจาะรูทะลุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ตรงกลาง โดยใช้ดอกกัด 20 mm และทำการเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 mm ความลึก 18 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm ความลึก 24 mm จากผิวบนสุดของชิ้นงานบริเวณมุมทั้งสองด้าน โดยใช้ดอกกัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm

(5) ใช้ดอกกัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm เจาะรูที่บริเวณรูเดิมทั้งสองด้าน ความลึก 38 mm จากผิวชิ้นงาน จึงถือว่าจบขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานมาตรฐาน



ภาคผนวก ข.

เงื่อนไข สภาพแวดล้อม และข้อกำหนดในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของ
เครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230

ข-1 เงื่อนไขของเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230

ชุดเครื่องมือ LIS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Renishaw ML10 การคำนวณและการวัดตำแหน่งความคลาดเคลื่อนด้วยชุดเครื่องมือ LIS นั้นจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 โดยที่ในมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 นั้นได้กำหนดเงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะทำการวัดด้วยชุดเครื่องมือ LIS ไว้ดังนี้

ข-1.1 เงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะทำการวัดค่าความคลาดเคลื่อน

- (1) เครื่องจักรได้ประกอบอย่างสมบูรณ์เรียบร้อยและต้องอยู่ในสภาพปกติ
- (2) ผู้ทำการวัดควรจะต้องติดตั้งหรือวางตำแหน่งต่างๆ (Alignment) ในเครื่องจักรและเครื่องวัดให้ถูกต้องเรียบร้อยก่อนทำการวัด
- (3) ถ้ามีเครื่องชดเชยค่าความผิดพลาดติดตั้งในตัวเครื่องจักรมาแล้ว และใช้ขณะทำการวัด ผู้ทำการวัดควรจะต้องบันทึกผลไปในการวัด
- (4) ในการวัดทุกเงื่อนไข ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นการวัดความตรง (Positioning / Straightness Error) หรือการวัดมุมความคลาดเคลื่อน (Rotational Error) ฯลฯ เครื่องจักรจะต้องอยู่ในสภาพที่ไม่มีภาระมากระทำ (Unloaded Condition) เช่น ไม่มีชิ้นงานอยู่ที่ปากกาจับชิ้นงาน เป็นต้น

ข-1.2 สภาพแวดล้อมของเครื่องจักรที่จะทำการวัดค่าความคลาดเคลื่อน

นอกจากเงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะตรวจสอบแล้ว มาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 ยังกำหนดเงื่อนไขในการวัดต่างๆ อีกเช่น สภาพแวดล้อมในการวัด จำนวนครั้งที่ใช้ในการวัด และการรายงานผลการวัด ดังต่อไปนี้

- (1) การวัดที่ดีควรจะควบคุมเครื่องมือการวัดและวัตถุที่จะวัด เช่น เครื่องจักร ให้อยู่ในอุณหภูมิประมาณ 20°C ถ้าอุณหภูมิขณะที่ทำการวัดน้อยหรือเกินกว่า 20°C จะมีการออกแบบการชดเชยในการวัดให้ได้ผลการวัดเทียบเท่ากับการวัดที่อุณหภูมิ 20°C
- (2) ในอุณหภูมิที่มากกว่าหรือน้อยกว่า 20°C อาจจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากอุณหภูมิที่นำมาใช้เพื่อชดเชยค่าอุณหภูมิ ในกรณีนี้กำหนดให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ในช่วง $\pm 2 \mu\text{m}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ และอุณหภูมิที่แท้จริงในการวัดควรจะเขียนไว้ในรายงานผลการวัด
- (3) อุณหภูมิของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เครื่องมือวัดควรจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สมดุล
- (4) เวลา 12 ชั่วโมงก่อนทำการวัด การเพิ่มของอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมของเครื่องจักรจะต้องอยู่ภายในกรอบความตกลงของผู้ผลิตและผู้ใช้งาน

ข-2 ข้อกำหนดและข้อตกลงในการวัดความผิดพลาดของเครื่องจักร

มาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 ได้ระบุไว้ว่าเครื่องจักรควรจะมีการเขียนโปรแกรมให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนที่จะวัดค่าตัวแปรความผิดพลาด และอัตราการป้อนที่ยอมรับได้ หรืออัตราการป้อนตามความตกลงของผู้ผลิต ในการเก็บค่าตัวแปรความผิดพลาดนั้นจะต้องมีการวัดเป็นช่วงที่เท่ากันตลอดจนกว่าจะถึงตำแหน่งเป้าหมายที่เราสนใจ ดังสมการที่ (ข-2.1)

$$P_i = (i-1)p + r \quad (\text{ข-2.1})$$

โดยที่ P_i = ตำแหน่งที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งจากตำแหน่งเริ่มต้น i จนถึงตำแหน่งสุดท้าย m

i = จำนวนตำแหน่งเป้าหมายทั้งหมด

p = ช่วงที่ใช้ในการวัด

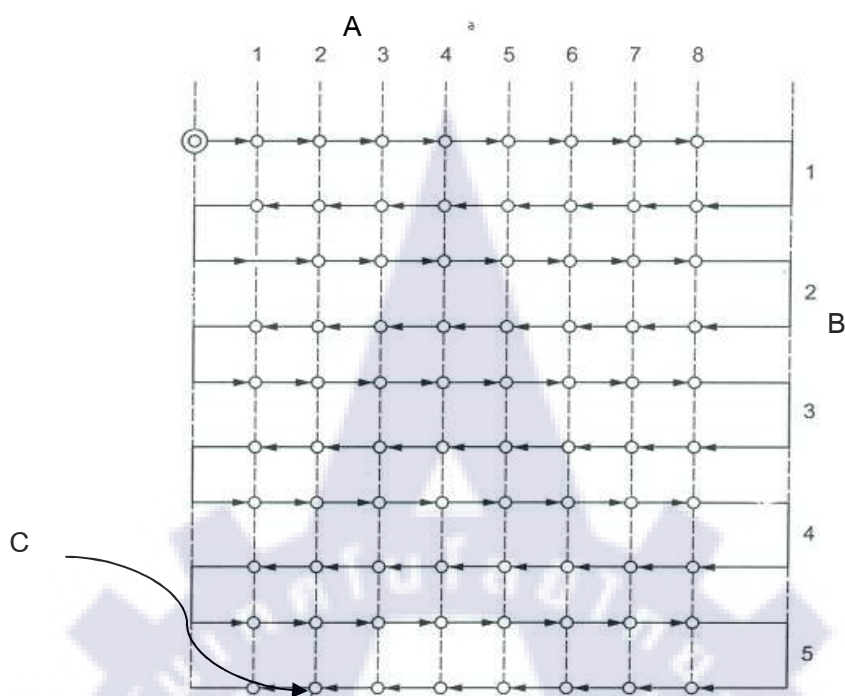
r = ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนการวัดเมื่อวัดครบ 1 รอบ

ซึ่งค่า r นั้น สามารถเกิดจากความคลาดเคลื่อนแบบมุมที่หมุนรอบแกน X (Pitch) หรือจากการหมุนของ Ballscrew ฯลฯ ถ้าค่านี้ไม่มีการกำหนดที่แน่นอนในเบื้องต้น ในมาตรฐาน ISO 230 ส่วนที่ 2 ถือว่าค่านี้จะเป็น $\pm 30\%$ ของค่าช่วงที่ใช้ในการวัด

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันบริษัทที่จำหน่ายชุดเครื่องมือ LIS มักจะเขียนโปรแกรมที่ให้กรอกเงื่อนไขด้านบนดังกล่าวก่อนเริ่มทำการวัด จึงทำให้สะดวกต่อผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก

ข-2.1 การวัดแนวตรง

สำหรับเครื่องจักรที่มีระยะเคลื่อนที่ไม่เกิน 2,000 mm ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการจะวัดจะต้องมีอย่างน้อย 5 ตำแหน่งต่อความยาวชิ้นงาน 1 m และการวัดจะต้องดำเนินการวัดทั้งขาไปและกลับเป็นจำนวนอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 5 รอบ ยกตัวอย่าง ดังรูปที่ ข- 1



รูปที่ ข- 1 ตัวอย่างการวัดค่าความคลาดเคลื่อนแนวตรงของเครื่องจักรที่มีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 2000 mm

รูปที่ ข- 1 แสดงตัวอย่างการวัดในกรณีที่เครื่องจักรมีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 2,000 mm ด้าน A คือจำนวนตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการวัดในรูปที่ 2.11 มีทั้งหมด 8 จุด และด้าน B คือ จำนวนรอบการวัดทั้งขาไปและขากลับ 5 รอบ และ C คือ ตำแหน่งเป้าหมายในการวัด

ในกรณีที่เครื่องจักรมีระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 2,000 mm ให้กำหนดรูปแบบการวัดตามสมการที่ (ข-2.1) และยึดรูปแบบการวัดตามรูปที่ ข- 1 แต่กำหนดช่วงในการวัด (p) เท่ากับ 250 mm เท่าๆ กันหมด

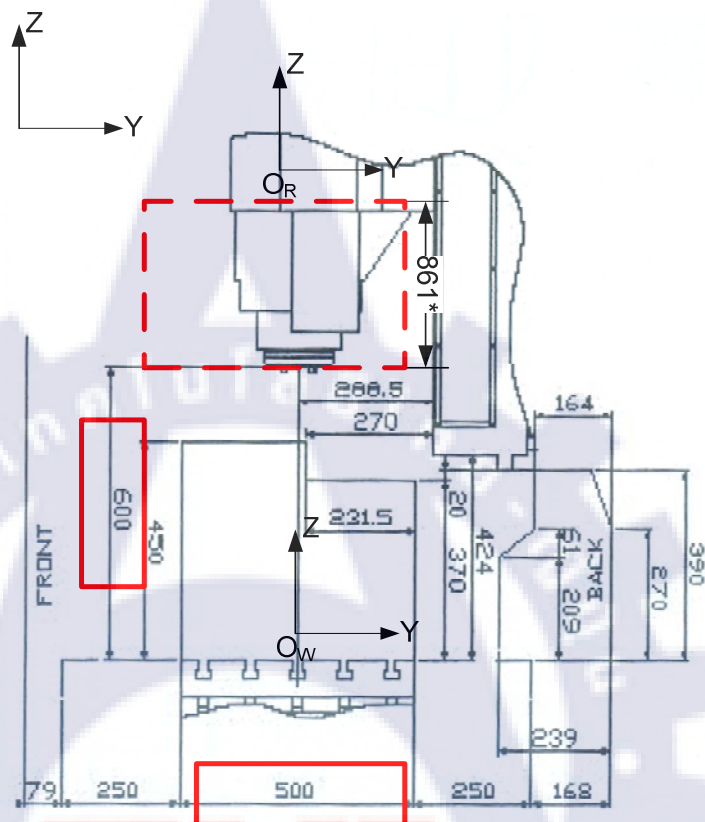
ภาคผนวก ค.

ค่าคงที่ของเครื่องกัดแนวตั้ง Makino S33



ค-1 แบบเครื่องจักร CNC Makino S33

ค่าคงที่และรูปภาพทั้งหมดในภาคผนวก ค. นี้ อ้างอิงจาก Makino (Thailand) Co.,Ltd Vertical Machining Center S-Series Installation Manual



รูปที่ ค-1 กรอบอ้างอิง O_R และ O_W

ที่มา : Makino (Thailand) Co.,Ltd. (2007, February). **Vertical Machining Center S-Series Installation.** p.35.

จากสมการที่ (3.1)

$$\tilde{T}_{O_i}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r1} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r1} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r1} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.1)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ ค-1 แล้วสามารถสรุปค่าคงที่ต่างๆได้ดังนี้

$$x_{r1} = y_{r1} = 0 \text{ mm}$$

$z_{r1} = 1,461 \text{ mm}$ (*เนื่องจากในคู่มือไม่ได้ให้ค่าความสูงของ Spindle ดังนั้นจึงทำการวัดความสูงของ Spindle หน้าเครื่อง)

จากสมการที่ (3.2)

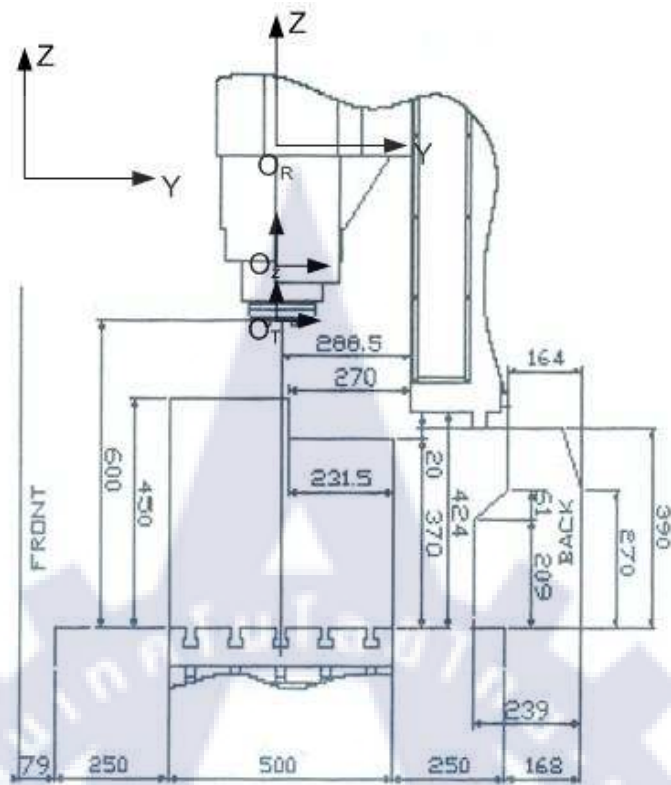
$$\tilde{\mathbf{T}}_{W}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ในการตั้งค่า a_1 , b_1 และ c_1 นั้นจะทำการตั้งตามการศูนย์ของชิ้นงาน โดยที่

$$a_1 = -303.6865 \text{ mm}$$

$$b_1 = 225.1953 \text{ mm}$$

$c_1 = 146 \text{ mm}$ (มาจากความสูงของปากกาจับชิ้นงาน คือ 96 mm และ ความสูงของชิ้นงานมาตรฐานคือ 50 mm)



รูปที่ ค- 2 กรอบอ้างอิง O_z และ O_T

ที่มา : Makino (Thailand) Co.,Ltd. (2007, February). **Vertical Machining Center S-Series Installation Manual.** p.35.

จากสมการที่ (3.8)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_2}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r2} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r2} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

กรอบอ้างอิง O_2 หรือกรอบอ้างอิงของแกน X อยู่กึ่งกลาง Spindle ของเครื่องจักร ดังนั้นเมื่อเคลื่อนที่ในแกน X มาตัดเจียนชิ้นงานจะเคลื่อนที่ออกจากกรอบอ้างอิง O_R ตามแนวการตั้งศูนย์เครื่อง ดังนั้น ค่า $x_{r2} = -303.6865 \text{ mm}$

จากสมการที่ (3.9)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_3 ideal}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

และสมการที่ (3.10)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_r ideal}^{O_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

จากรูปที่ ค-2 กรอบอ้างอิงของแกน Z O_2 หรือ O_3 มีระยะห่างจากกรอบอ้างอิง O_r ในทิศทางแกน Z เท่ากับ 150 mm (วัดจากหน้าเครื่องและยังไม่รวมระยะการตั้งศูนย์ชิ้นงานในแกน Z เท่ากับ 225.6991) ดังนั้นเมื่อรวมค่าคงที่ทั้งหมดจะสามารถได้ดังนี้คือ

$$a_2 = b_2 = a_3 = b_3 = 0 \text{ mm}$$

$$c_2 = -711 \text{ mm}$$

$$c_3 = -375.6991 \text{ mm}$$

อภิธานศัพท์

ศัพท์	คำอธิบายศัพท์	คำย่อ/สัญลักษณ์
Artifact	ชิ้นงานที่ทำขึ้นมาเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของเครื่องมือวัด หรือ สอบเทียบเครื่องมือวัด	
Coordinate Measuring Machine	เครื่องวัดขนาด 3 แกน	CMM
Geometric Error	ความผิดพลาดของรูปทรงของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร	
Laser Interferometer System	ชุดเครื่องมือวัดเลเซอร์	LIS
Pitch	ค่าความผิดพลาดเชิงมุมเนื่องจากการหมุนรอบแกนในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่	$\varepsilon_y(x)^*$
Roll	ค่าความผิดพลาดเชิงมุมเนื่องจากการหมุนรอบแกนในแนวการเคลื่อนที่	$\varepsilon_x(x)^*$
Scale Error	ค่าความผิดพลาดเชิงเส้นตามแนวการเคลื่อนที่	$\delta_x(x)^*$
Straightness Error	ค่าความผิดพลาดแนวตรง	$\delta_y(x)^*, \delta_z(x)^*$
Yaw	ค่าความผิดพลาดเชิงมุมเนื่องจากการหมุนรอบแกนในแนวตั้งที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่	$\varepsilon_z(x)^*$

*ตัวอักษรในวงเล็บ () แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ และตัวอักษรห้อย แสดงทิศทางของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น