



รายงานการวิจัย

การสอบเทียบเครื่องจักร CNC โดยการกัดชิ้นงาน

Multi – Axis Machine Calibration by Machined Artifact Method

ผู้วิจัย

วราคม เน็ดน้อย

วิโรจน์ ทักษะ

พิมพ์เพชร สระทองอ่อน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณวิจัยประจำปี 2554

คำนำ

รายงานการวิจัยฉบับนี้ได้กล่าวถึงการสอบเทียบเครื่องกัด Makino, S33 ซึ่งเป็นเครื่องกัดแนวตั้งแบบ 3 แกน และใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร และเก็บค่าตัวแปรความผิดพลาดตามกระบวนการมาตรฐาน ISO-230 เปรียบเทียบกับการวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ซึ่งจากการวิจัยค้นพบว่าการวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 สามารถประเมินค่าความผิดพลาด (Geometric Error) ที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล และ ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย ที่ปรึกษาและที่ปรึกษาร่วมในงานวิจัยนี้ ที่คอยให้คำปรึกษา แก้ปัญหาต่างๆ หาอุปกรณ์สนับสนุนการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขรูปเล่มรายงานฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ อ.วิโรจน์ ทศนะ ที่ร่วมแรงร่วมใจสอนผู้ทำวิจัยตั้งแต่การเขียนโปรแกรม G-Code ไปจนถึงแก้ปัญหาการใช้งานที่เกิดจากเครื่องจักร CNC และคำแนะนำในกระบวนการผลิตชิ้นงานมาตรฐาน

หากในรายงานการวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาด หรือใช้ภาษาเขียนที่ไม่ถูกต้อง ทางคณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

TNI

คณะผู้จัดทำ

7 มิถุนายน 2555

บทคัดย่อ

คุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องและเที่ยงตรงของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต การลดความผิดพลาดที่เกิดจากโครงสร้าง (Geometric Errors) ของเครื่องจักร ทำให้เครื่องยังคงรักษาความถูกต้องและเที่ยงตรงของเครื่องจักรได้ งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกัด CNC แนวตั้ง (Makino, S33) และวัดค่า Geometric Errors โดยเครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer System, LIS) ตามมาตรฐาน ISO-230 เพื่อคำนวณค่าตำแหน่งความผิดพลาดตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับการวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน (CMM) จากนั้นทำการเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชิ้นงาน (ISO-10791) และการคำนวณด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (ISO-230) ผลจากการวิจัยพบว่า การวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 สามารถประมาณค่า Geometric Errors ที่คำนวณได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้

คำสำคัญ: Geometric Errors, เครื่องกัดแนวตั้ง, เครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน, เครื่องวัดเลเซอร์, กระบวนการผลิต

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Abstract

Quality of machined parts depends on the accuracy of machine movements in machining processes. In order to improve accuracy of machined parts, all parameters of geometric error of machine movement must be characterized and compensated. A mathematical error-model of 3-axes Vertical Milling Machine Center was derived from a model of imperfect motion of a rigid body. The error-dimensions of the machined part that may affect to each error-parameter were measured by Coordinate Measurement Machine. The errors parameters were then analyzed from those error-dimensions. Then, direct measurement of error parameters were measured by Laser Interferometer System according to the ISO-230 standard. These measured parameters are compared to the analyzed error parameter.

Keywords— Geometric error, vertical milling machine, coordinate measurement machine, Laser Interferometer System, machining processes

TNI

สารบัญ

บทที่

หน้า

คำนำ

บทคัดย่อ

Abstract

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญรูปภาพ

1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
	ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	3
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
	แผนการดำเนินงาน.....	4
2	หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
	ทบทวนวรรณกรรม.....	5
	ประเภทของความผิดพลาดของเครื่องจักร.....	6
	ตัวแปรความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร.....	7

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	การคำนวณตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่เกิดจากการเลื่อนและการหมุนโดย	
	ใช้เมตริกซ์จัตุรัสและเมตริกซ์เอกพันธ์.....	8
	Mapping ตำแหน่งจากการเลื่อน.....	9
	Mapping ตำแหน่งจากการหมุน.....	11
	โมเดลคณิตศาสตร์ของเครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33.....	14
	หลักการทำงานของ Michelson Interferometer.....	21
	หลักการทำงานของเครื่องวัดเลเซอร์ Renishaw ML10.....	22
	การคำนวณและการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรด้วยเครื่อง	
	วัดเลเซอร์.....	24
	เงื่อนไขของเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมในการวัดค่าความคลาดเคลื่อน	
	ของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230.....	27
	มาตรฐาน ISO-10791 ส่วนที่ 7 ในการทดสอบเครื่องจักร CNC.....	30
3	วิธีการดำเนินงานและแผนการวิจัย.....	32
	ISO-10791.....	32
	ISO-230.....	33
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่อง CMM.....	35
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	37
บรรณานุกรม	38
ประวัติผู้ทำวิจัย	40

TNI

THAI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สถาบันเทคโนโลยี - ญี่ปุ่น

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน	4
2.1 แสดงจำนวนตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ 3 แกน	8
2.2 แสดงประเภท, ขนาดและมาตรฐานที่กำหนดในการทดสอบชิ้นงาน	31
4.1 เปรียบเทียบการคำนวณระหว่างการคำนวณค่า Straightness Error ตามแนวแกน Y โดยใช้สมการที่ (21) กับการวัดและคำนวณจาก CMM	36

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	ผังการดำเนินงาน	2
2.1	เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปในแกน x แกนเดียว	7
2.2	แสดงการเคลื่อนที่ของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง m ไปยังกรอบอ้างอิง c	10
2.3	แสดงกรอบอ้างอิง [u v w] ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง [X Y Z]	11
2.4	ภาพของกรอบอ้างอิง [u v w] เมื่อหมุนรอบแกน x ด้วยมุม θ_x	12
2.5	แบบจำลองและระบบพิกัดของเครื่องจักร CNC Makino S33	14
2.6	การกำหนด Coordinate frame ของเครื่องจักร CNC Makino S33	15
2.7	หลักการทำงานของ Michelson Interferometer	21
2.8	การแทรกสอดของคลื่นแสงอ้างอิงกับคลื่นแสงที่สะท้อนจากกระจกที่เคลื่อนที่	21
2.9	ระบบการวัดโดยเครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer System)	22
2.10	การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector เพื่อทำการวัดแนวตรง	24
2.11	การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector ในการวัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุม.....	25
2.12	แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรเนื่อง- จากมุมบนตัวเครื่องจักร	26

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
2.13	ตัวอย่างการวัดค่าความคลาดเคลื่อนแนวตรงของเครื่องจักรที่มีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 2000 mm	29
3.1	มุมมองด้านบนของชิ้นงานมาตรฐาน	32
3.2	ภาพตัดด้าน Z-Z	33
3.3	แผนการดำเนินงาน	34
4.1	แผนภาพการกระจายและ Linear Regression ของข้อมูล	36
4.2	กราฟเปรียบเทียบค่า Straightness Error แนวแกน Y ระหว่างใช้สมการ (21) กับการวัดและคำนวณโดยใช้ CMM	37

บทที่ 1

บทนำ

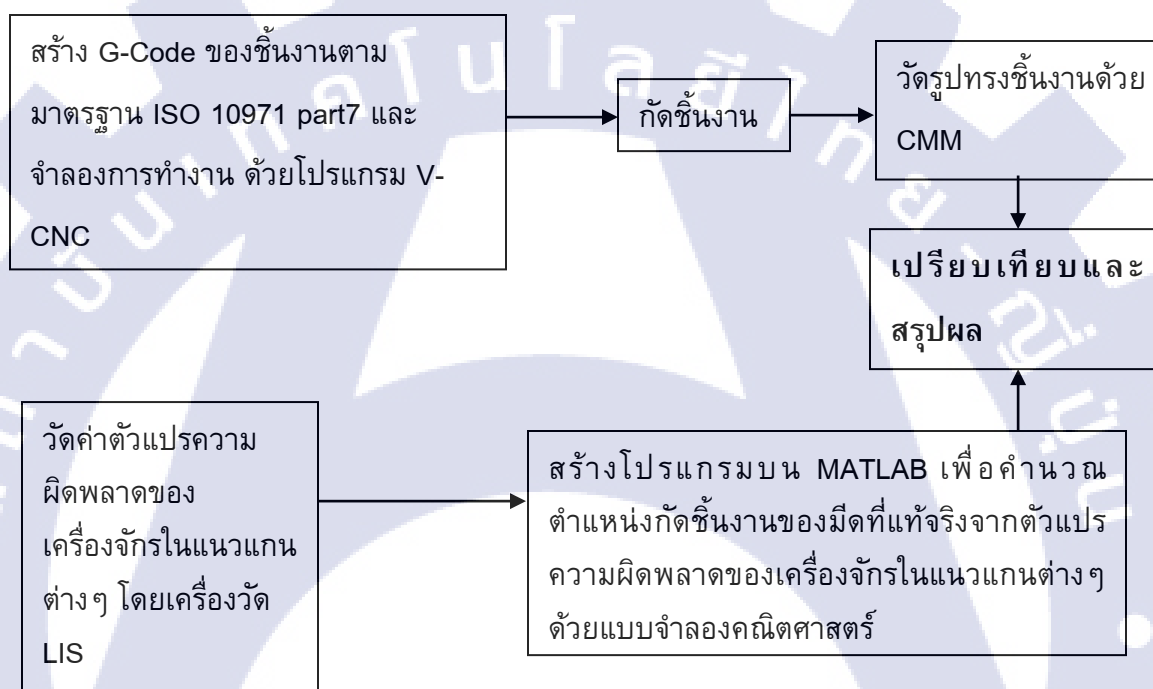
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการผลิตสินค้าจำนวนมากและเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค เครื่องจักรนับเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ อุตสาหกรรมจำนวนมากจึงนิยมใช้เครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) มาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน เนื่องจากเครื่องจักร CNC ใช้คอมพิวเตอร์ในการรับคำสั่ง และควบคุมการทำงานของเครื่องจักร ดังนั้นเครื่องจักร CNC จึงสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องสูง เมื่อชิ้นส่วนมีความถูกต้องตามแบบจะทำให้ การประกอบชิ้นงานสำเร็จทำได้อย่างรวดเร็ว และได้ชิ้นงานสำเร็จที่มีความทนทานสูง เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีความถูกต้อง เครื่องจักรที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนจะต้องมีความเที่ยงตรง (Precision) และความถูกต้อง (Accuracy)

เครื่องจักรที่ใช้งานการผลิตจะมีการเคลื่อนที่ไปมาบนรางเลื่อนตลอดเวลา ทำให้เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเป็นประจำทุกปี เพื่อที่จะคงสภาพของความถูกต้องในการทำงานของเครื่องจักร ส่วนมากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องจักรจะใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า Laser Interferometer System (LIS) เข้ามาตรวจสอบ โดยการวิธีการตรวจสอบนั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ISO-230 เนื่องจากเครื่อง LIS นั้นมีระดับความละเอียดในการวัดถึงระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตามเครื่อง LIS นั้นมีราคาแพง และยังหาผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องได้ยาก แต่ภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการการตรวจสอบเครื่องจักรที่สามารถทำได้ด้วยตัวเอง มีราคาไม่แพง และรวดเร็ว โดยให้มีความถูกต้องในการตรวจสอบที่ยอมรับได้ และมีความน่าเชื่อถือ ถ้าไม่ต้องจ้างผู้เชี่ยวชาญจากภายนอกด้วยจะยิ่งดี

มาตรฐาน ISO-10791 กำหนดเงื่อนไขที่ใช้สำหรับทดสอบเครื่องจักร โดยกำหนดผ่านค่าพิกัดความเพี้ยนรูปทรง (Geometric Dimensioning and Tolerance, GD&T) ในการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐานดังกล่าวจะต้องถูกขึ้นรูปโดยเครื่องจักรที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดสอบด้วยมาตรฐาน ISO-10791 เป็นวิธีที่ง่าย และไม่ต้องการผู้เชี่ยวชาญจากภายนอก

ในงานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้เครื่องวัด 3 แกน (Coordinate Measuring Machine, CMM) มาตรวจสอบค่าพิสัยความเผื่อรูปทรงของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด CNC แนวตั้ง กับการวัดค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในแนวแกนต่างๆ ด้วยเครื่อง LIS เพื่อพิจารณาผลของค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรส่งผลต่อค่าพิสัยความเผื่อรูปทรงได้อย่างไรบ้าง โดยเครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือ เครื่องกัด CNC แนวตั้ง รุ่น Makino S33 ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ซึ่งมีการดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังการดำเนินงาน

เริ่มจากการกัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 ในส่วนที่ 7 ประเภท A ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบความถูกต้องของเครื่องจักร CNC เงื่อนไขที่กำหนดในมาตรฐาน ISO-10791 มีหลายประการ เช่น การกัดเป็นวงกลมหรือการกัดทำมุมเฉียง เป็นต้น จากนั้นทำการวัดรูปทรงของชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่อง CMM เพื่อเก็บค่าไว้เปรียบเทียบ ทำการวัดตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในแนวแกนต่างๆ ด้วยเครื่อง LIS จากนั้นคำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมีดกัดโดยอาศัยสมการของการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Kinematics of Rigid

Body) แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างการวัดรูปทรงชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่อง CMM กับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมิตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรในแนวแกนต่างๆ ร่วมกับโมเดลคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร CNC

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรที่วัดจากกระบวนการ ISO-230 ว่ามีผลต่อค่าพิกัดความเพี้ยนรูปทรงของชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 อย่างไร

ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

1. พิจารณาศึกษาตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดของเครื่องจักร เนื่องจากตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักร และเปรียบเทียบกับรูปทรงที่ผิดพลาดไปของชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO-10791 (มาตรฐานที่กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบความถูกต้องของเครื่องจักร CNC)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงผลกระทบของค่าตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC ที่มีต่อค่าพิกัดความเพี้ยนรูปทรงของชิ้นงาน
2. สามารถใช้กระบวนการนี้เพื่อการประเมินความผิดพลาดของเครื่องจักรในเบื้องต้น
3. เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่อง CMM และเครื่องวัด LIS

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนวรรณกรรม

การสอบเทียบ (Calibration) เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้เครื่องจักรมีความแม่นยำและถูกต้องตามมาตรฐานของเครื่องจักรนั้นๆ ซึ่งการสอบเทียบในหนึ่งครั้งจะกินเวลาและต้องใช้เงินลงทุนจำนวนหนึ่ง ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าสามารถลดขั้นตอนการสอบเทียบของเครื่องจักรได้ก็จะลดทั้งเวลาและเงินลงทุนในการสอบเทียบ ในวงการวิจัยเรื่องการสอบเทียบเครื่องจักรนั้น A.C. Okafor ได้เสนอหลักการของการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งเขียนขึ้นเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้เมตริกซ์เอกพันธ์เพื่อทำนายความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC, Cincinnati Milacron Sabre 750 อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร (A.C. Okafor, Yalcin M. Ertekin. 1999) หลังจากนั้น W.Nerdnoi ได้ทำการเสนอผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาการวัดค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดของเครื่องจักรโดยใช้ Laser Interferometer Tracking System (LITS) โดยระบบ Tracking System นี้สามารถทำให้เครื่องวัดเลเซอร์วัดตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรได้หลายพารามิเตอร์ทั้งในแนวแกน x, y และ z โดยไม่ต้องเสียเวลาทำการจัดวางเครื่องและอุปกรณ์การวัดในแต่ละแกน (W. Nerdnoi. 1999) ต่อมา J.P. Choi ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาการตรวจสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในเครื่องจักรโดยเปลี่ยนจากตรวจสอบโดยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน เป็นการวัดขนาดชิ้นงาน ณ ขณะที่ชิ้นงานมาตรฐานยังอยู่บนเครื่องจักร (On-machine measurement, OMM) เปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากเครื่องจักร โดยแบบจำลองค่าความผิดพลาดนั้นสร้างขึ้นจากสมการพหุนามและหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสที่ติดตั้งบนเครื่องจักร โดยใช้ลูกบาศก์ (Cube array artifact) ทั้งหมด 9 ลูกบาศก์ ที่สามารถวัดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์แบบสัมผัสทั้งการเคลื่อนที่ขาไปและกลับ แต่ก่อนที่จะติดตั้ง artifact บนเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บนเครื่องจักร จะต้องมีการสอบเทียบ artifact โดยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกนก่อน ผลต่างของค่าตำแหน่งของการวัดทั้งขาไปและขากลับของเครื่องวัดขนาดชิ้นงานที่อยู่บน

เครื่องจักรกับเครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบ 3 แกนจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่นำไปใส่ในสมการพหุนาม เพื่อทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร (J.P. Choi, B.K. Min. 2004)

ในงานวิจัยของ Chen เสนอวิธีการวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรทั้ง 21 ตัวแปร (รวมตัวแปรของการตั้งฉากซึ่งกันและกันในแนวแกน x,y และ z อีก 3 ตัวแปร) โดยใช้เครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer) วัดการกระจัดทั้งหมด 15 เส้นทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไป ผลปรากฏว่าเครื่องวัดเลเซอร์สามารถวัดค่าตัวแปรความคลาดเคลื่อนทั้ง 21 ตัวแปรของเครื่องจักร 3 แกน ได้รวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ (G. Chen, J. Yuan. 2001) ต่อมา Manukid ได้เสนอวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรอันเนื่องมาจากโครงสร้างและน้ำหนัก โดยใช้วิธีการ Neural network และในโมเดลคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรนั้น ได้รวมความผิดพลาดที่เกิดจากแรงที่มีผลต่อเครื่องจักร (M. Parnichkun, C. Raksiri. 2004) หลังจากนั้นในงานวิจัยของ Shaowei ได้เสนอปรับปรุงวิธีการวัดและการชดเชยตัวแปรความผิดพลาดเหล่านี้โดยพัฒนาโปรแกรมที่รวมเอาโมเดลคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร (Geometric Error Model) กับการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC ให้โปรแกรมเข้าไปชดเชยความผิดพลาดที่ G-Code จากนั้นนำโปรแกรมนี้ไปใช้กับเครื่องจักร CNC 5 แกน (S. Zhu, G. Ding. 2011)

ประเภทของความผิดพลาดของเครื่องจักร

กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความผิดพลาดของเครื่องจักร ได้จำแนกประเภทความผิดพลาดของเครื่องจักรออกเป็น 2 ประเภทคือ (วราคม เนินน้อย, การปรับเทียบเครื่องจักร CNC : 4-7)

1. Quasistatic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดมาจากรูปร่างที่ผิดพลาด (Geometric Error) หรือเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนย่อยที่มาประกอบเป็นเครื่องจักร รวมถึงความผิดพลาดที่เกิดจากน้ำหนักและอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดความเครียดในตัวเครื่องจักร ทำให้โครงสร้างของเครื่องจักรผิดรูปไป จากการศึกษา

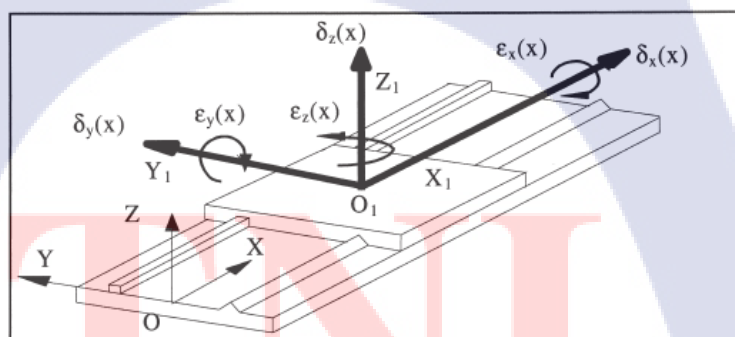
พบว่าความผิดพลาดประเภทนี้เป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้เครื่องจักรเกิดความผิดพลาดถึง 70%

2. Dynamic Error คือความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์, แรงสั่นสะเทือนในโครงสร้างของเครื่องจักร และความผิดพลาดในชุดควบคุมตำแหน่ง

ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดมาจากรูปร่างหรือจากการสึกหรอของชิ้นส่วนย่อยของเครื่องจักรอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงผลที่เกิดจากอุณหภูมิและน้ำหนัก

ตัวแปรความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

ตัวแปรความผิดพลาดของเครื่องจักรแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ 1.ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเลื่อน (Linear error parameter) ซึ่งประกอบไปด้วย Straightness error และ Scale error และ 2.ตัวแปรความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการหมุน (Angular error parameter) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรอีก 3 ตัวแปรคือ Roll, Pitch และ Yaw ดังรูปที่ 2.1 Roll คือการหมุนรอบแกน x, Pitch คือการหมุนรอบแกน y และ Yaw คือการหมุนรอบแกน z



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปในแกน x แกนเดียว

โดยให้ δ_x แทน Scale error ซึ่งจะเกิดขึ้นตามทิศที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไป ดังรูปที่ 2.1

เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปในแกน x

δ_y และ δ_z แทน Straightness error ในแนวระนาบและแนวดิ่งตามลำดับ

ε_x แทนความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน x (Roll)

ε_y แทนความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน y (Pitch)

ε_z แทนความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน z (Yaw)

ทั้งหมดนี้เป็นค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ในแกนเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 แกนด้วยกัน ดังนั้นตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นรวมแล้วจะมีทั้งหมด 18 ตัวแปร ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงจำนวนตัวแปรค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเคลื่อนที่ 3 แกน

	จำนวนตัวแปร
Scale error	3
Straightness error	6
Angular error	9
	Total = 21

การคำนวณตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่เกิดการเลื่อนและการหมุน โดยใช้เมตริกซ์จัตุรัสและเมตริกซ์เอกพันธ์

เมตริกซ์จัตุรัสนั้นเป็นเมตริกซ์ที่มีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนหลัก และยังง่ายต่อการหาผลคูณและการหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ ในขณะที่เมตริกซ์เอกพันธ์ก็เป็นเมตริกซ์ที่มีคุณสมบัติในการกำหนดตำแหน่งและกรอบ เนื่องจากคุณสมบัติของเมตริกซ์เอกพันธ์คือจำนวนสมาชิกที่อยู่ในเมตริกซ์นั้นจะต้องเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยและตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นถ้าต้องการจะกำหนดพิกัดและตำแหน่งอ้างอิงด้วยเมตริกซ์จัตุรัสที่เป็นเมตริกซ์เอกพันธ์ควรกำหนดดังตัวอย่างในสมการที่ (1) (Jennifer Kay, 2005: 7-10)

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} U_x & W_x & V_x & P_x \\ U_y & W_y & V_y & P_y \\ U_z & W_z & V_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & w \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดย w คือ Weighting Factor ใช้ในกรณีที่มองภาพเป็นสามมิติเสมือนจริงหรือ (Perspective View) ซึ่งค่า w จะมีค่ามากเมื่อมองในมุมมองระยะใกล้และมีค่าน้อยเมื่อมองจากระยะไกล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีมุมมองเป็นภาพสามมิติเหมือนจริงแต่อย่างใด ดังนั้นจึงกำหนดค่า w เท่ากับ 1

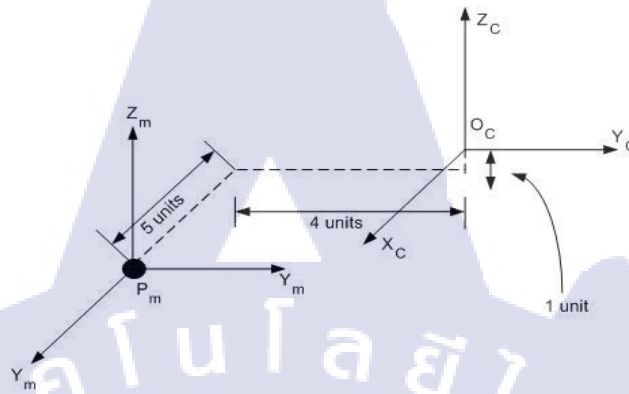
Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการเลื่อน

การเลื่อน (Translation) เป็นการเคลื่อนที่ใน 3 มิติที่ทิศทางของวัตถุที่เคลื่อนที่โดยไม่มีการหมุนเกิดขึ้น โดยเราสามารถหาตำแหน่งของกรอบที่เลื่อนที่ไปเทียบกับกรอบอ้างอิงได้โดยการบวกหรือลบเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่กรอบได้เคลื่อนที่ไป ตัวอย่างเช่น กรอบอ้างอิงอยู่ที่จุด (0,0,0) จากนั้นได้มีการเลื่อนกรอบไปเป็นระยะ d หน่วยทั้งแนวแกน X , Y และ Z ดังนั้นเมตริกซ์บอกการเลื่อนตำแหน่งที่เป็นทั้งเมตริกซ์เอกพันธ์และเมตริกซ์จัตุรัสจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยค่า d_x , d_y และ d_z เป็นค่าที่บอกว่าตำแหน่งได้เกิดการเลื่อนที่เป็นระยะทาง d ในแกน X , Y และ Z ตามลำดับ และสามารถสังเกตได้ว่าสมาชิกในแถวที่ 1 หลัก 2 และ 3 , สมาชิกในแถวที่ 2 หลัก 1 และ 3 และสมาชิกในแถวที่ 3 หลัก 1 และ 2 มีค่าเป็นศูนย์ นั่นแสดงถึงว่าการเคลื่อนที่นั้นเกิดเฉพาะการเลื่อนตำแหน่งไม่เกิดการหมุนนั่นเอง ดังนั้นในกรณีที่อยากทราบว่าตำแหน่งที่กรอบอ้างอิงเลื่อนที่ไปมีค่าเป็นเท่าใดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม จึงทำได้โดยการเอาเมตริกซ์บอกการเลื่อนตำแหน่งไปคูณกับตำแหน่งอ้างอิงเดิม ผลที่ได้จากการคูณนั้นก็จะเป็นตำแหน่งของกรอบอ้างอิงใหม่เมื่อกับกรอบอ้างอิงเดิม ยกตัวอย่างเช่น จุด P_m ที่อยู่บนจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิง m มี

พิกัด (0,0,0) เกิดการเลื่อนที่ไปยังกรอบอ้างอิง c โดยที่เลื่อนไปในทางแกน X เป็น -5 หน่วย เลื่อนไปทางแกน Y เป็น 4 หน่วย และเลื่อนไปทางแกน Z เป็น 1 หน่วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเลื่อนที่ของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง m ไปยังกรอบอ้างอิง c

จากรูปที่ 2.2 จะสามารถเขียนเมตริกซ์การเลื่อนที่ได้เป็น

$$\tilde{\mathbf{T}}_m^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -5 \\ 0 & 1 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

และสามารถเขียนเมตริกซ์ที่ระบุตำแหน่งของจุด P_m ที่อยู่บนกรอบอ้างอิง m ในระบบพิกัด X, Y และ Z คือ

$$\hat{\mathbf{P}}_m = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ถ้าจุด P_m เคลื่อนที่ไปที่กรอบอ้างอิง c และเราต้องการจะหาว่าจุด P_m ที่เคลื่อนที่ไปที่กรอบอ้างอิง c นั้นเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าใดเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง m ทำได้โดยนำสมการที่ (3) คูณกับสมการที่ (4) จะเป็นดังสมการที่ (5)

$$\hat{\mathbf{P}}_m^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -5 \\ 0 & 1 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 \\ 4 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

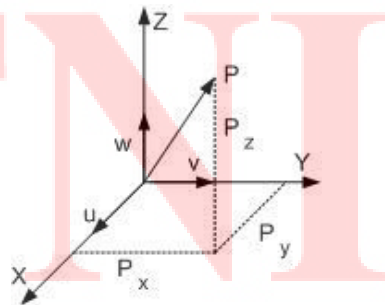
โดยสัญลักษณ์ $\tilde{\mathbf{T}}_m^c$ เป็นการบอกว่าเมตริกซ์นี้คือเมตริกซ์ที่บอกตำแหน่งการเลื่อนที่ของกรอบอ้างอิง c เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง m

ในกรณีที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y ดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้ δ_y คือ Scale error และ δ_x และ δ_z คือ Straightness error ในทิศทางแกน X และ Z ดังนั้นเมตริกซ์ของตัวแปรความผิดพลาดเนื่องจากการเลื่อนจะเป็นดังสมการที่ (6)

$$\tilde{\mathbf{E}}_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

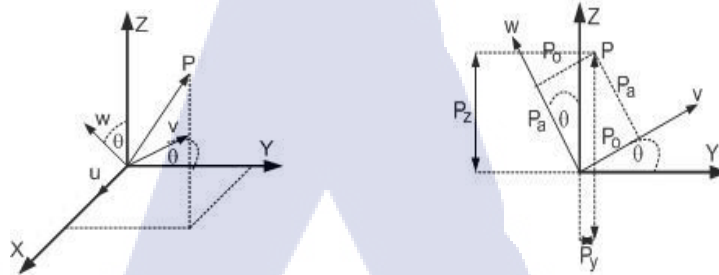
Mapping ตำแหน่งเนื่องจากการหมุน

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 (P. Smithmaitrie, 2009 : Online)



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 ซ้าย: ภาพ 3 มิติของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ เมื่อหมุนรอบแกน x ด้วยมุม θ_x

ขวา: มุมมอง 2 มิติของภาพด้านซ้ายมือ

หลังจากการหมุนแล้วพิกัด (P_n, P_o, P_a) เทียบกับกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ยังเหมือนเดิม แต่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง $[X \ Y \ Z]$ จะเป็นดังนี้

$$P_x = P_n \quad (7)$$

$$P_y = P_o \cos \theta_x - P_a \sin \theta_x \quad (8)$$

$$P_z = P_a \cos \theta_x + P_o \sin \theta_x \quad (9)$$

ซึ่งถ้านำสมการ(6),(7) และ (8) ทั้ง 3 สมการนี้มาจัดรูปแบบให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ก็จะได้เมตริกซ์จัตุรัสที่มีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์เอกพันธ์และเป็นเมตริกซ์ที่บ่งบอกการหมุนด้วย ดังนี้

$$\tilde{\mathbf{R}}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) จะเห็นได้ว่าแถวที่ 1 ไม่มีพจน์ของไซน์และโคไซน์เกิดขึ้น เนื่องมาจากว่าแกน X ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการหมุนรอบแกน X และสมาชิกหลักสุดท้ายในเมตริกซ์แสดงการหมุนทั้งหมดจะเป็นศูนย์เนื่องจากการไม่มีการเลื่อนเกิดขึ้น อีกทั้งสมการที่ (9) ยังสามารถบอกได้อีกว่าจะต้องนำเอาเมตริกซ์เอกพันธ์ที่บ่งบอกการหมุนมาคูณกับพิกัดที่ทราบแน่ชัดของกรอบอ้างอิงที่หมุนไป ก็จะได้พิกัดที่แท้จริงของกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงเดิม

ดังนั้นถ้าเกิดการหมุนของกรอบอ้างอิง $[u \ v \ w]$ ในแกน Y และ Z เป็นมุม θ_y และ θ_z ตามลำดับ ก็จะสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$\tilde{\mathbf{R}}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

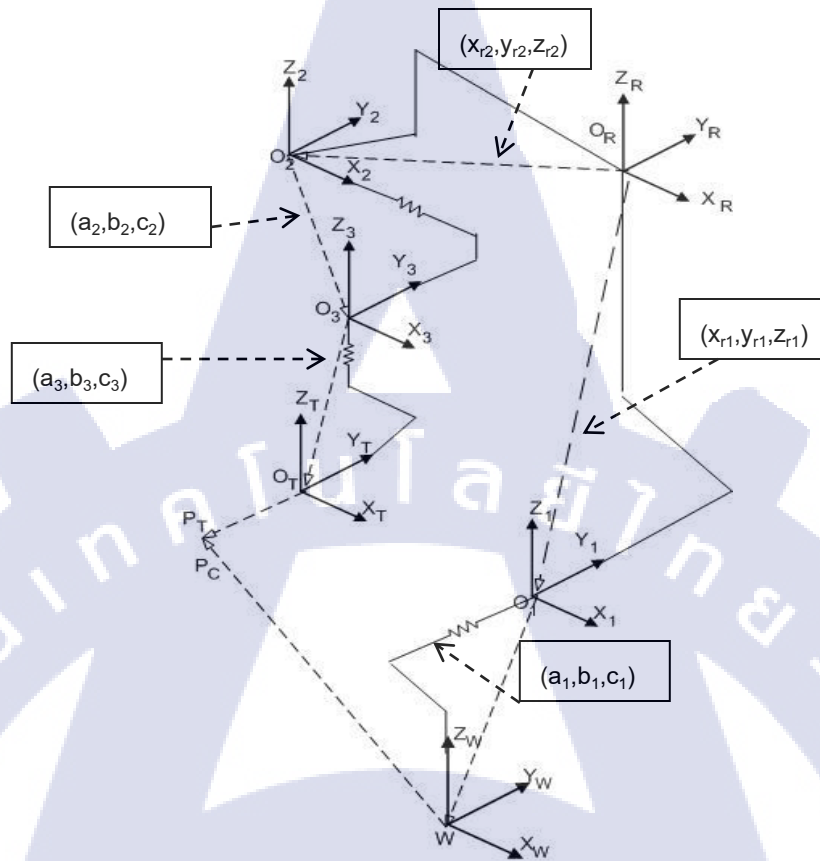
$$\tilde{\mathbf{R}}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

นำสมการที่ (10), (11) และ (12) มาคูณกันเพื่อหาเมตริกซ์การหมุนของทั้งสามแกนจะเป็นดังสมการที่ (13)

$$\tilde{\mathbf{R}}_{xyz} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & -\cos \theta_y \sin \theta_z & \sin \theta_y & 0 \\ \cos \theta_x \sin \theta_z + \cos \theta_z \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & -\cos \theta_y \sin \theta_x & 0 \\ \sin \theta_x \sin \theta_z - \cos \theta_x \cos \theta_z \sin \theta_y & \cos \theta_z \sin \theta_x + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

มุม θ_x , θ_y และ θ_z มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากค่า ดังนั้นโคไซน์จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งและไซน์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ กำหนดให้สัญลักษณ์ ε คือค่าความผิดพลาดเนื่องจากการหมุน ดังนั้นสมการที่ (14) จะกลายเป็นสมการความผิดพลาดเนื่องจากการหมุน

$$\tilde{\mathbf{E}}_{rot} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & 0 \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & 0 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$



รูปที่ 2.6 การกำหนด Coordinate frame ของเครื่องจักร CNC Makino S33

พิจารณาที่โต๊ะงาน (เฟรม O_1) ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y เมตริกซ์เอกพันธ์ที่บอกตำแหน่งของเครื่องจักรเฉพาะการเคลื่อนที่ของแกน Y จากจุดศูนย์ของเครื่องจักร (เฟรม O_R) เทียบกับกรอบอ้างอิง X, Y และ Z เป็นดังสมการที่ (15)

$$\tilde{T}_{O_1}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r1} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r1} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

โดยที่ x_{r1} , y_{r1} และ z_{r1} เป็นระยะที่ห่างจากเฟรม O_R ในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

ค่าของ x_{r1} , y_{r1} และ z_{r1} สามารถดูได้จากคู่มือการติดตั้งของเครื่องจักร Makino, S33 ในกรณีอุดมคติ ถ้าเครื่องจักรเคลื่อนที่โดยที่ไม่มีควมผิดพลาดเกิดขึ้นเลย เมตริกซ์เอกพันธ์ที่เทียบจากโต๊ะงาน (เฟรม O_1) มายังจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน (เฟรม W) จะเป็นดังสมการที่ (16)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{W ideal}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

โดยที่ a_1 , b_1 และ c_1 คือ ระยะห่างจากเฟรม O_1 มายังจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน (เฟรม W)

ถ้าตำแหน่งของโต๊ะงานที่เคลื่อนที่ไปเป็นตำแหน่ง $\hat{\mathbf{P}}_C^W(X_w, Y_w, Z_w)$ เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ดังสมการที่ (17)

$$\hat{\mathbf{P}}_C^W = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ดังนั้นจุดที่โต๊ะงานเคลื่อนที่เทียบกับศูนย์ของเครื่องจักรในอุดมคติเป็นดังสมการที่ (18)

$$\hat{\mathbf{P}}_{C ideal}^R = \tilde{\mathbf{T}}_{O_1}^R \tilde{\mathbf{T}}_{W ideal}^{O_1} \hat{\mathbf{P}}_C^W = \begin{bmatrix} a_1 + x_{r1} + p_x \\ b_1 + y_{r1} + p_y \\ c_1 + z_{r1} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

อย่างไรก็ตามแท้จริงแล้ว เมื่อเครื่องจักรเกิดการเคลื่อนที่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะของการเลื่อนที่และการหมุน ดังนั้นสมการที่ (16) จะกลายเป็น

$$\tilde{\mathbf{T}}_{W actual}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z1} & \varepsilon_{y1} & a_1 + \delta_{x1} \\ \varepsilon_{z1} & 1 & -\varepsilon_{x1} & b_1 + \delta_{y1} \\ -\varepsilon_{y1} & \varepsilon_{x1} & 1 & c_1 + \delta_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

โดย δ_{y1} , δ_{x1} และ δ_{z1} คือ scale 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
(20)

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{p}}_{C \text{ actual}}^R &= \tilde{\mathbf{T}}_{O_1 \text{ ideal}}^R \tilde{\mathbf{T}}_{W \text{ actual}}^{O_1} \hat{\mathbf{p}}_C^W \\ \therefore \hat{\mathbf{p}}_{C \text{ actual}}^R &= \begin{bmatrix} a_1 + x_{r1} + \delta_{x1} + p_x - \varepsilon_{y1}p_z + \varepsilon_{z1}p_y \\ b_1 + y_{r1} + \delta_{y1} + p_y + \varepsilon_{x1}p_z - \varepsilon_{z1}p_x \\ c_1 + z_{r1} + \delta_{z1} + p_z - \varepsilon_{x1}p_y + \varepsilon_{y1}p_x \\ 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (20)$$

ค่าความผิดพลาดของโต๊ะงานที่เคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับศูนย์ของเครื่องจักรคือ

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{\text{table}} = \hat{\mathbf{p}}_{C \text{ actual}}^R - \hat{\mathbf{p}}_{C \text{ ideal}}^R = \begin{bmatrix} \delta_{x1} + \varepsilon_{y1}p_z - \varepsilon_{z1}p_y \\ \delta_{y1} - \varepsilon_{x1}p_z + \varepsilon_{z1}p_x \\ \delta_{z1} + \varepsilon_{x1}p_y - \varepsilon_{y1}p_x \end{bmatrix}\quad (21)$$

พิจารณาที่หัวกั๊ดขึ้นงาน (Spindle) ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ
จะถือว่าไม่มีค่าความผิดพลาดทั้งการเคลื่อนที่และการหมุนเกิดขึ้น ดังนั้นเมตริกซ์เอกพันธ์ที่บอกการ
เคลื่อนที่ของเฟรม O_2 เทียบกับตำแหน่งศูนย์ของเครื่องจักร (เฟรม O_R) ในกรอบอ้างอิง X , Y และ Z
เป็นดังสมการที่ (22)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_2 \text{ ideal}}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{r2} \\ 0 & 1 & 0 & y_{r2} \\ 0 & 0 & 1 & z_{r2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (22)$$

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

จากนั้นพิจารณาการเคลื่อนที่ของเฟรม O_3 เมื่อเทียบกับเฟรม O_2 ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ
เป็นดังสมการที่ (23) กำหนดให้ a_2 , b_2 และ c_2 คือระยะห่างจากเฟรม O_2 กับเฟรม O_3

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_3}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของเฟรม O_3 เทียบกับการเคลื่อนที่ของดอกกัท (เฟรม O_T) ในกรณีการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ จะเป็นดังสมการที่ (24) กำหนดให้ a_3 , b_3 และ c_3 คือระยะห่างของเฟรม O_3 กับเฟรม O_T

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_T}^{O_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

โดยปกติแล้วหัวกัทของชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งเดียวกับโต๊ะงานตามสมการที่ (17) เพื่อที่จะตัดเนื้องาน ซึ่งในการเคลื่อนที่แบบอุดมคติ ตำแหน่งที่หัวกัทของชิ้นงานเคลื่อนที่ไปที่จุดตัดเนื้องานเทียบกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน เป็นดังสมการที่ (25)

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_T^R &= \tilde{\mathbf{T}}_{O_2}^R \tilde{\mathbf{T}}_{O_3}^{O_2} \tilde{\mathbf{T}}_T^{O_3} \hat{\mathbf{p}}_T^W \\ \hat{\mathbf{p}}_T^R &= \begin{bmatrix} a_2 + a_3 + p_x + x_{r2} \\ b_2 + b_3 + p_y + y_{r2} \\ c_2 + c_3 + p_z + z_{r2} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

แต่ในความเป็นจริงแล้วจะเกิดความผิดพลาดขณะที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ทั้งการเลื่อนและการหมุน ดังนั้น เมตริกซ์เอกพันธ์ของหัวกัทชิ้นงานเทียบกับจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรจะต้องรวมค่าความผิดพลาดทั้งการเลื่อนและการหมุนรวมไปด้วย ดังนั้นสมการที่ (22) กลายเป็น

$$\tilde{\mathbf{T}}_{O_3}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z2} & \varepsilon_{y2} & \delta_{x2} + a_2 \\ \varepsilon_{z2} & 1 & -\varepsilon_{x2} & \delta_{y2} + b_2 \\ -\varepsilon_{y2} & \varepsilon_{x2} & 1 & \delta_{z2} + c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

กำหนดให้ ε_{x2} ε_{y2} และ ε_{z2} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของเฟรม O_2
 δ_{x2} , δ_{y2} และ δ_{z2} คือ ค่า scale และ straightness error ที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนของเฟรม O_2
 ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันสมการที่ (24) จะเป็นดังสมการที่ (27)

$$\tilde{\mathbf{T}}_{T \text{ actual}}^{O_3} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{z3} & \varepsilon_{y3} & \delta_{x3} + a_3 \\ \varepsilon_{z3} & 1 & -\varepsilon_{x3} & \delta_{y3} + b_3 \\ -\varepsilon_{y3} & \varepsilon_{x3} & 1 & \delta_{z3} + c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

กำหนดให้ ε_{x3} ε_{y3} และ ε_{z3} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของเฟรม O_3
 δ_{z3} , δ_{y3} และ δ_{x3} คือ ค่า scale และ straightness error ที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนของเฟรม O_3
 ตามลำดับ

ดังนั้นในความเป็นจริงตำแหน่งที่หัวกัทจะเคลื่อนที่ไปที่จุดตัดเนือนดังสมการที่ (17) เทียบกับ
 ตำแหน่งศูนย์ของเครื่องจักรเป็นดังสมการที่ (28)

$$\hat{\mathbf{p}}_{T \text{ actual}}^R = \tilde{\mathbf{T}}_{O_2}^R \tilde{\mathbf{T}}_{O_3 \text{ actual}}^{O_2} \tilde{\mathbf{T}}_{T \text{ actual}}^{O_3} \hat{\mathbf{p}}_T^W$$

$$\therefore \hat{\mathbf{p}}_{T \text{ actual}}^R = \begin{bmatrix} a_2 + a_3 + \delta_{x2} + \delta_{x3} + x_{r1} + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) \\ -p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z3}\varepsilon_{z3} - 1) \\ -\varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ b_2 + b_3 + \delta_{y2} + \delta_{y3} + y_{r2} + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) \\ -p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) \\ + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ c_2 + c_3 + \delta_{z2} + \delta_{z3} + z_{r2} + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) \\ -p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) \\ -\varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

ดังนั้นค่าความผิดพลาดของหัวกัดชิ้นงานเมื่อเทียบกับจุดศูนย์ของเครื่องจักรจะเป็นดังสมการที่ (29)

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

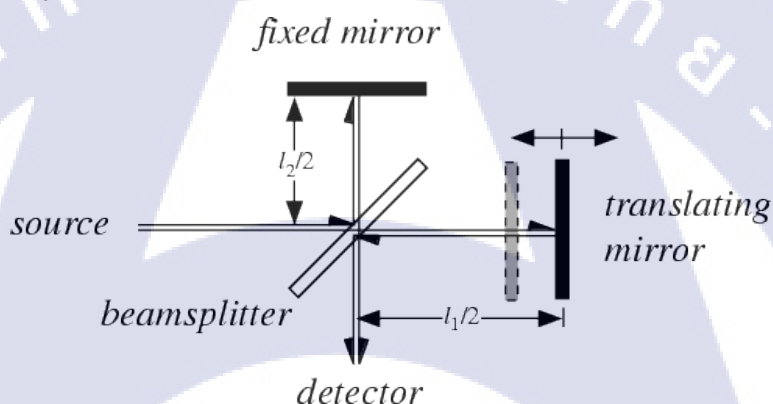
$$\therefore \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{spindle} = \begin{bmatrix} \delta_{x2} + \delta_{x3} - p_x + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) \\ - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) - \varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{y2} + \delta_{y3} - p_y + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) - p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) \\ - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{z2} + \delta_{z3} - p_z + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) - p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) \\ - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) - \varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

เนื่องจากโครงสร้างของเครื่อง CNC, Makino S33 มีการแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของโต๊ะงานและส่วนของหัวกัดชิ้นงานอย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (21) บวกกับสมการที่ (29) จะได้เป็นสมการค่าความผิดพลาดของเครื่องจักร CNC, Makino S33 ดังสมการที่ (30)

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{total} = \begin{bmatrix} \delta_{x1} + \delta_{x2} + \delta_{x3} - p_x + p_z(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} + \varepsilon_{x3}\varepsilon_{z2}) - p_y(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} - \varepsilon_{x3}\varepsilon_{y2}) \\ + \varepsilon_{y1}p_z - \varepsilon_{z1}p_y - p_x(\varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) - \varepsilon_{z2}(b_3 + \delta_{y3}) + \varepsilon_{y2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{y1} + \delta_{y2} + \delta_{y3} - p_y + p_x(\varepsilon_{z2} + \varepsilon_{z3} + \varepsilon_{x2}\varepsilon_{y3}) - p_z(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} - \varepsilon_{y3}\varepsilon_{z2}) \\ - \varepsilon_{x1}p_z + \varepsilon_{z1}p_x - p_y(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{z2}\varepsilon_{z3} - 1) + \varepsilon_{z2}(a_3 + \delta_{x3}) - \varepsilon_{x2}(c_3 + \delta_{z3}) \\ \delta_{z1} + \delta_{z2} + \delta_{z3} - p_z + p_y(\varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{z3}) - p_x(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{y3} - \varepsilon_{x2}\varepsilon_{z3}) \\ + \varepsilon_{x1}p_y - \varepsilon_{y1}p_x - p_z(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{y2}\varepsilon_{y3} - 1) - \varepsilon_{y2}(a_3 + \delta_{x3}) + \varepsilon_{x2}(b_3 + \delta_{y3}) \end{bmatrix} \quad (30)$$

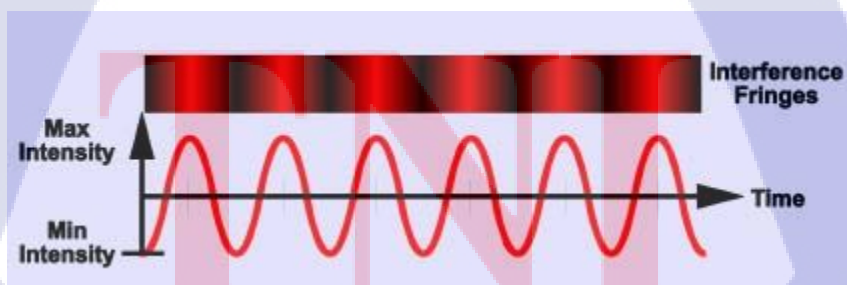
หลักการทำงานของ Michelson Interferometer

หลักการทำงานของพื้นฐานของเครื่องวัดเลเซอร์อ้างอิงจากหลักการทำงานของ Michelson Interferometer ดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือเครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ (Source) จะยิงลำแสงเลเซอร์สีแดงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 633 nm ไปที่กระจกแยกลำแสง (Beam Splitter) กระจกแยกลำแสงจะแยกลำแสงเลเซอร์เป็น 2 ลำด้วยกัน ลำแสงแรกจะสะท้อนไปที่กระจกตัวที่ยึดติดอยู่หนึ่งกับที่ (Fixed Retroreflector) ซึ่งต่อมาจะใช้ลำแสงนี้เป็นลำแสงอ้างอิง ในขณะที่ลำแสงที่สองจะมุ่งไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Translationg Mirror) จากนั้นลำแสงทั้งสองจะสะท้อนกลับไปที่ตัวตรวจจับสัญญาณแสง (detector) และเกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงทั้งสองจนเกิดเป็นด้านมืดและด้านสว่างดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของ Michelson Interferometer

ที่มา: University of Twente, The Netherlands. (2012). **Infrared Spectroscopy**. : ออนไลน์

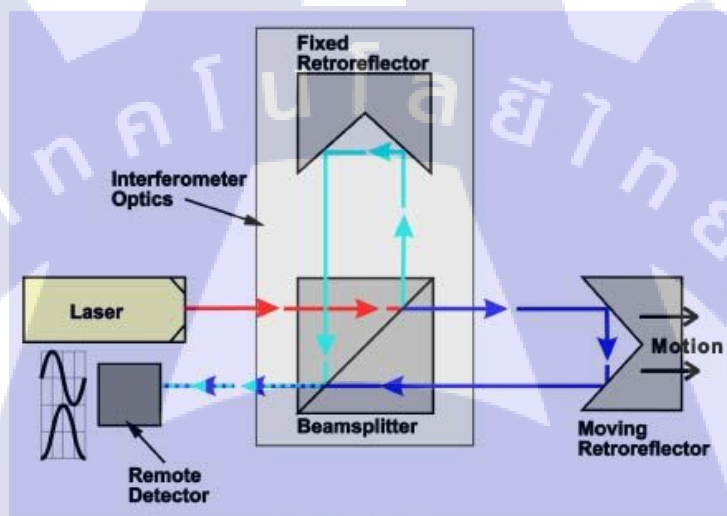


รูปที่ 2.8 การแทรกสอดของคลื่นแสงอ้างอิงกับคลื่นแสงที่สะท้อนจากกระจกที่เคลื่อนที่

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

หลักการทำงานของเครื่องวัดเลเซอร์ Renishaw ML10

จากหลักการการทำงานของ Michelson Interferometer จึงทำให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือวัดโดยใช้แสงเลเซอร์หรือ Laser Interferometer และได้เปลี่ยนจากการใช้กระจกมาใช้อุปกรณ์สะท้อนแสงคือ Retro-Reflector ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถสะท้อนแสงกลับในแนวขนานกับลำแสงที่ตกกระทบกับตัวกระจก จากรูปที่ 2.9 แสดงระบบการวัดโดยใช้เครื่องวัดเลเซอร์ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 2.9 ระบบการวัดโดยเครื่องวัดเลเซอร์ (Laser Interferometer System)

ที่มา: Aerotech. (2011). Laser Interferometer Implementation. : ออนไลน์

1. เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ : ให้กำเนิดแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 633 nm
2. Beam Splitter: ทำหน้าที่แยกลำแสงเป็น 2 ลำแสง ลำแสงแรกสะท้อนไปยัง Retro-Reflector ที่อยู่ใกล้ที่ และลำแสงที่สองทะลุผ่าน Beam Splitter ไปยัง Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่
3. Retro-Reflector : แบ่งออกเป็น 2 ชั้นด้วยกัน

3.1 Fixed Retro-Reflector: จะให้สัญญาณคลื่นแสงที่สะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจวัดมีค่าคงที่เนื่องจาก Retro-Reflector ยึดติดอยู่กับที่ ดังนั้นจะให้สัญญาณแสงที่สะท้อนกลับจาก Fixed Retro-Reflector เป็นสัญญาณอ้างอิง

3.2 Moving Retro-Reflector: Retro-Reflector ตัวที่เคลื่อนที่ โดยที่เมื่อ Retro-Reflector ตัวนี้เคลื่อนที่ไปจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจจับมีระยะทางเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดกับสัญญาณแสงอ้างอิง

4. เครื่องตรวจจับ (Detector): ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณการแทรกสอดของคลื่นแสงโดยแปลงจากแถบมืด, สว่าง, มืด, สว่าง.... เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าออกมาจากเครื่องตรวจจับ การนับจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสัญญาณจะสามารถนำไปคำนวณหาระยะทางการเคลื่อนที่ของ Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่ได้

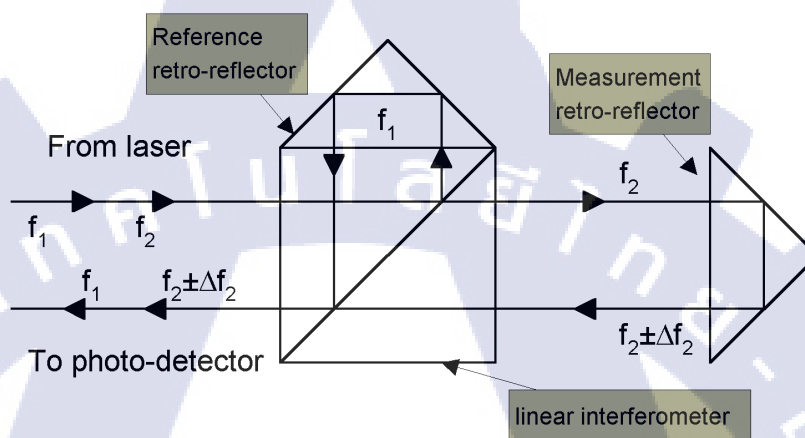
เนื่องจากความยาวคลื่นของแสง Laser นั้น สามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) ซึ่งเปลี่ยนค่าไปตามตัวกลางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่าน ทั้งนี้ดัชนีการหักเหแสงของอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นของบรรยากาศ ดังนั้นในการคำนวณระยะทางที่ Moving Retro-Reflector เคลื่อนที่ไปอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ด้วยเหตุนี้ในระบบการวัดเลเซอร์จึงได้พัฒนาเซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิเพื่อชดเชยค่าความเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหแสงในระบบการวัดด้วยเลเซอร์

TNI

การคำนวณและการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรด้วยเครื่องวัดเลเซอร์

การวัดแนวตรง

การใช้เครื่องวัดเลเซอร์ทำการวัดค่า Scale และ Straightness error จะทำการจัดวาง Beam Splitter และ Retro-Reflector ดังรูป 2.10



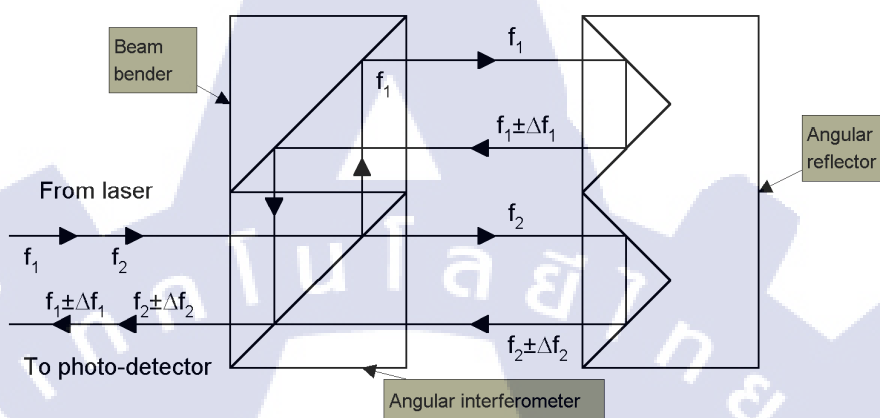
รูปที่ 2.10 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector เพื่อทำการวัดแนวตรง

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

จากรูปที่ 2.10 ลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงมาจากเครื่องกำเนิดแสงเข้าสู่ Beam Splitter เพื่อทำการแยกลำแสงออกเป็นสองลำ ลำแสงแรกจะสะท้อนไปยัง Retro-Reflector ที่ยึดติดอยู่กับที่ แล้วกลับไปเครื่องตรวจวัด ด้วยเหตุนี้ลำแสงแรกจึงใช้เป็นลำแสงอ้างอิง ในขณะที่ลำแสงที่สองจะผ่าน Beam Splitter ไปสะท้อนกับ Retro-Reflector ที่เคลื่อนที่หรือตำแหน่งเป้าหมายของการวัด แล้วกลับมาที่เครื่องตรวจวัดสัญญาณ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของลำแสงทั้งสองลำนี้ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแสง จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถคำนวณระยะทางที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปได้ (Nerdnoi. 1999 : 30-32)

การวัดมุม

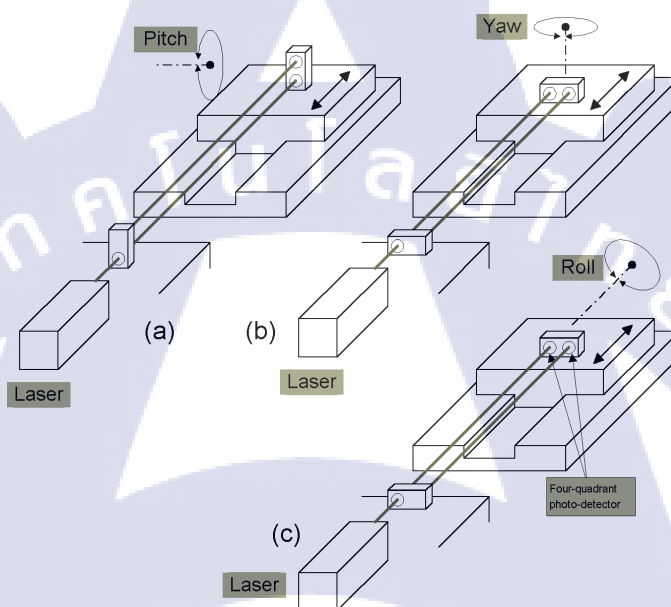
การวัดความคลาดเคลื่อนอันเกิดเนื่องจากมุมที่หมุนไปของเครื่องจักร จะทำการจัดวาง Beam Splitter และ Retro-Reflector ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดวาง Beam Splitter กับ Retro-Reflector ในการวัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุม ที่มา : Warakom Nerdnoi. (1999, November). 3D Laser Interferometer Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration. หน้า 32.

การวัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุมของเครื่องจักร การติดตั้ง Retro-Reflector จะแตกต่างจากวัดแนวตรงเล็กน้อย จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการวัดมุมความคลาดเคลื่อนนั้น นอกจากจะติดตั้ง Beam Splitter แล้วยังติดตั้งอุปกรณ์หักเหแสงอีกหนึ่งตัวเรียกว่า Beam Bender ทำหน้าที่หักเหแสงให้ตั้งฉากกับรังสีตกกระทบ อีกทั้งติดตั้ง Retro-Reflector 2 ตัว ชิดติดกันเรียกว่า Angular Reflector หรือ Twin Reflector สำหรับการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุมจะมีหลักการทำงานคือ แสงเลเซอร์ถูกยิงจากเครื่องกำเนิดแสงเข้าสู่ Beam Splitter ที่ทำหน้าที่แยกลำแสงออกเป็นสองลำแสง โดยที่ลำแสงที่หนึ่ง ความถี่ f_1 เมื่อวิ่งผ่าน Beam Splitter แล้วจะไปสะท้อนกับ Beam Bender ซึ่งทำหน้าที่หักเหคลื่นแสง จากนั้นลำแสงจะเคลื่อนที่ไปตกกระทบบน Angular Reflector สะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจวัดสัญญาณคลื่นแสงขณะเดียวกัน ลำแสงที่สอง ความถี่ f_2 จะวิ่งทะลุผ่าน Beam Splitter ไปยัง Angular Reflector อีกตัวหนึ่ง แล้วสะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจวัดสัญญาณเช่นกัน

ครั้งแรกที่เริ่มทำการวัดจะสังเกตได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดเนื่องจากมุมคือมุม 0° แต่เมื่อ Angular Reflector ตัวใดตัวหนึ่งหมุนจะทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงทั้งสองลำ ซึ่งค่าความแตกต่างของรีเฟรการแทรกสอดจะมีค่าเท่ากับ $\Delta f_2 - \Delta f_1$ จึงทำให้ระบบประมวลผลของระบบการวัดเลเซอร์สามารถคำนวณหาค่ามุมที่เปลี่ยนไปในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรได้



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรเนื่องจากมุมบนตัวเครื่องจักร

การวัดมุมความคลาดเคลื่อนที่หมุนรอบแกน X หรือ Pitch ตามรูป 2.12(a) จะติดตั้งอุปกรณ์ไว้ตั้งฉากกับโต๊ะของเครื่องจักรเพื่อวัดมุมที่หมุนรอบแกน X ในส่วนของการวัดมุมความคลาดเคลื่อนที่หมุนรอบแกน Z หรือ Yaw ตามรูป 2.12(b) เพื่อวัดการหมุนรอบแกน Z ที่เปลี่ยนไป จึงติดตั้งอุปกรณ์การวัดขนานกับโต๊ะของเครื่องจักร อย่างไรก็ตามจะสามารถสังเกตได้ว่าการวัดมุมที่หมุนรอบแกน Y หรือ Roll ดังรูป 2.12(c) จะไม่สามารถวัดได้เนื่องจากอุปกรณ์ไม่สามารถหมุนรอบแกน Y ได้ ดังนั้นในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกน Y จะใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นมาวัดแทน เช่น Four-Quadrant Photodiode

เงื่อนไขของเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักร ตามมาตรฐาน ISO-230

เครื่องวัดเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Renishaw ML10 การคำนวณและการวัดตำแหน่งความคลาดเคลื่อนด้วยเครื่องวัดเลเซอร์นั้นจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 โดยที่ในมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 นั้นได้กำหนดเงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะทำการวัดด้วยเครื่องวัดเลเซอร์ไว้ดังนี้

เงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะทำการวัดค่าความคลาดเคลื่อน

เงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะทำการวัดเป็นดังนี้

1. เครื่องจักรได้ประกอบอย่างสมบูรณ์เรียบร้อยและต้องอยู่ในสภาพปกติ
2. ผู้ทำการวัดควรจะต้องติดตั้งหรือวางตำแหน่งต่างๆ (alignment) ในเครื่องจักรและเครื่องวัดให้ถูกต้องเรียบร้อยก่อนทำการวัด
3. ถ้ามีเครื่องชดเชยค่าความผิดพลาดติดตั้งในตัวเครื่องจักรมาแล้วและใช้ขณะทำการวัด ผู้ทำการวัดควรจะต้องบันทึกผลไปในผลการวัด
4. การวัดทุกเงื่อนไขทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นการวัดความตรง (Positioning/Straightness Error) หรือการวัดมุมความคลาดเคลื่อน (Rotational Error) ฯลฯ เครื่องจักรจะต้องอยู่ในสภาพที่ไม่มาภาระมากระทำ (Unloaded Condition) เช่น ไม่มีชิ้นงานอยู่ที่ปากกาจับชิ้นงาน เป็นต้น

สภาพแวดล้อมของเครื่องจักรที่จะทำการวัดค่าความคลาดเคลื่อน

นอกจากเงื่อนไขของเครื่องจักรที่จะตรวจสอบแล้ว มาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 ยังกำหนดเงื่อนไขในการวัดต่างๆอีกเช่น สภาพแวดล้อมในการวัด จำนวนครั้งที่ใช้ในการวัด และการรายงานผลการวัด ดังต่อไปนี้

1. การวัดที่ดีควรจะควบคุมเครื่องมือการวัดและวัตถุที่จะวัด เช่น เครื่องจักร ให้อยู่ในอุณหภูมิประมาณ 20°C ถ้าอุณหภูมิขณะที่ทำการวัดน้อยหรือเกินกว่า 20°C จะมีการออกแบบการชดเชยในการวัดให้ได้ผลการวัดเทียบเท่ากับการวัดที่อุณหภูมิ 20°C
2. ในอุณหภูมิที่มากกว่าหรือน้อยกว่า 20°C ในการวัดอาจจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่นำมาใช้เพื่อชดเชยค่าอุณหภูมิ ในกรณีนี้กำหนดให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ในช่วง $\pm 2 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ และอุณหภูมิที่แท้จริงในการวัดควรที่จะเขียนไว้ในรายงานผลการวัด
3. อุณหภูมิของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เครื่องมือวัดควรที่จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สมดุล
4. เวลา 12 ชั่วโมงก่อนทำการวัด การเพิ่มของอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมของเครื่องจักรจะต้องอยู่ภายในกรอบความตกลงของผู้ผลิตและผู้ใช้งาน

ข้อกำหนดและข้อตกลงในการวัดความผิดพลาดของเครื่องจักร

มาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 ได้ระบุไว้ว่าเครื่องจักรควรจะมีการเขียนโปรแกรมให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนที่จะวัดค่าตัวแปรความผิดพลาดและอัตราการป้อนที่ยอมรับได้หรืออัตราการป้อนตามความตกลงของผู้ผลิต และจะต้องมีการวัดเป็นช่วงที่เท่ากันตลอดจนกว่าจะถึงตำแหน่งเป้าหมายที่เราสนใจ อย่างไรก็ตามการวัดจากจุดเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมายจะต้องทำการวัดเป็นช่วงที่เท่าๆกันดังสมการที่ (30)

$$P_i = (i-1)p + r \quad (30)$$

โดยที่ P_i = ตำแหน่งที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งจากตำแหน่งเริ่มต้น i จนถึงตำแหน่งสุดท้าย m

i = จำนวนตำแหน่งเป้าหมายทั้งหมด

p = ช่วงที่ใช้ในการวัด

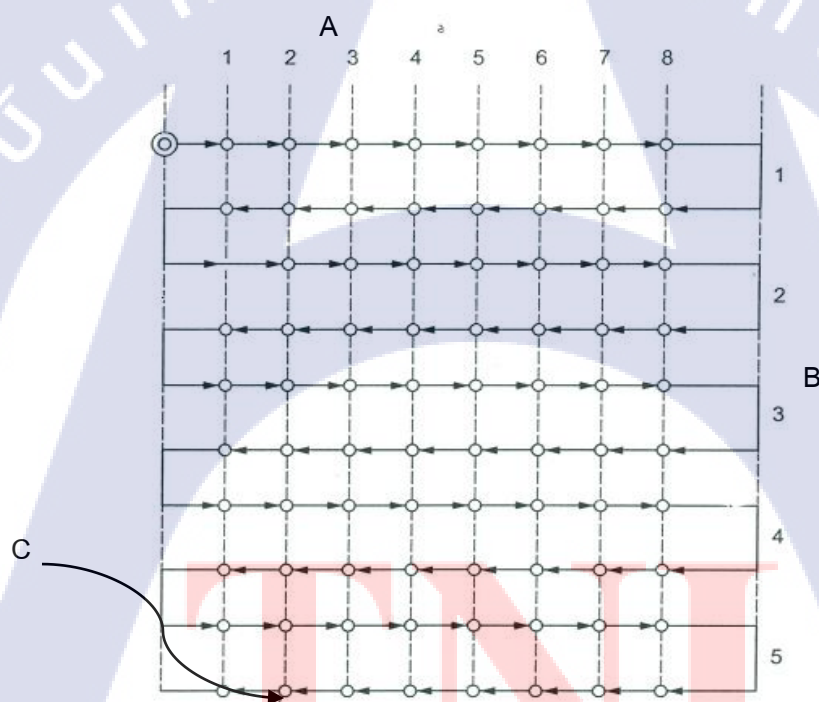
r = ขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนการวัดเมื่อวัดครบ 1 รอบ ซึ่งสามารถเกิดจากความคลาดเคลื่อนแบบมุมที่หมุนรอบแกน $\times$ (pitch) หรือจากการหมุนของ ballscrew ฯลฯ ถ้าค่านี้

ไม่มีการกำหนดที่แน่นอนในเบื้องต้น ในมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่ 2 ถือว่าค่านี้จะเป็น $\pm 30\%$ ของค่าช่วงที่ใช้ในการวัด

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันบริษัทที่จำหน่ายเครื่องวัดเลเซอร์มักจะเขียนโปรแกรมที่ให้กรอกเงื่อนไขด้านบนดังกล่าวก่อนเริ่มทำการวัด จึงทำให้สะดวกต่อผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก

การวัดแนวตรง

สำหรับเครื่องจักรที่มีระยะเคลื่อนที่ไม่เกิน 2000 mm ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการจะวัดจะต้องมีอย่างน้อย 5 ตำแหน่งต่อความยาวชิ้นงาน 1 m และการวัดจะต้องดำเนินการวัดทั้งขาไปและกลับเป็นจำนวนอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 5 รอบ ยกตัวอย่างดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการวัดค่าความคลาดเคลื่อนแนวตรงของเครื่องจักรที่มีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน

2000 mm

รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างการวัดในกรณีที่เครื่องจักรมีระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 2000 mm ด้าน A คือจำนวนตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการวัดในรูปที่ 2.12 มีทั้งหมด 8 จุด และด้าน B คือ จำนวนรอบการวัดทั้งขาไปและขากลับ 5 รอบ และ C คือ ตำแหน่งเป้าหมายในการวัด

ในกรณีที่เครื่องจักรมีระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 2000 mm ให้กำหนดรูปแบบการวัดตามสมการที่ (30) และยึดรูปแบบการวัดตามรูปที่ 2.12 แต่กำหนดช่วงในการวัด (p) เท่ากับ 250 mm เท่าๆกันหมด

มาตรฐาน ISO-10791 ส่วนที่ 7 ในการทดสอบเครื่องจักร CNC

มาตรฐาน ISO-10791 เป็นมาตรฐานที่สร้างเงื่อนไขในการทดสอบเครื่องจักร CNC แบบ 3 แกนขึ้นไป ซึ่งแบ่งส่วนที่ทดสอบออกเป็น 12 ส่วน โดยแต่ละส่วนก็จะเป็นแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ทดสอบเครื่องจักร CNC เช่น ส่วนที่ 6 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราการป้อน, ความเร็ว และการเดินของเครื่องมือ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการจะหาค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดของเครื่องจักรเท่านั้น จึงทดสอบเฉพาะในส่วนที่ 7 ซึ่งเป็นการทดสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่กัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว (Accuracy of a finished test piece)

ในส่วนที่ 7 นั้นได้อ้างอิงมาจากมาตรฐาน ISO-230 ส่วนที่1 ในเรื่องของการตรวจสอบชิ้นงานที่กัดเสร็จสมบูรณ์, วัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานตลอดจนถึงขนาดของชิ้นงานทดสอบ โดยมาตรฐานนี้มีเป้าหมายที่จะทดสอบคุณลักษณะของเครื่องจักรดังนี้

1. ความถูกต้องของตำแหน่ง (position accuracy) และการเดินซ้ำ (repeatability) ของเครื่องจักรในแกน X, Y และ Z
2. การโค้งงอของชิ้นส่วนเครื่องจักรภายใต้สภาวะการตัดเฉือน
3. ความตึงฉากของแกน X และ Y ของเครื่องจักร
4. ความสามารถในการเดินเป็นวงกลมของเครื่องจักรในระนาบ X-Y

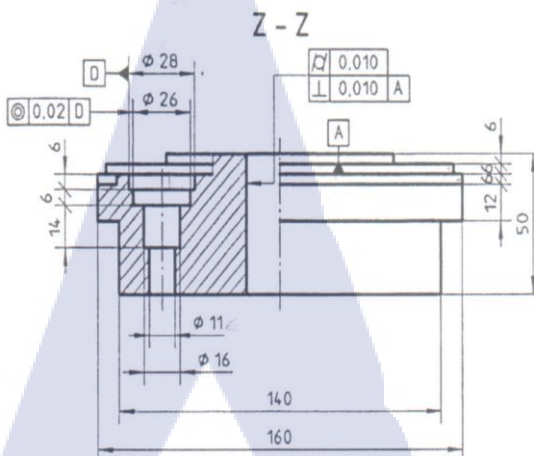
ขนาดชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ทดสอบนั้นจะมี 2 ประเภท ซึ่งขนาดของชิ้นงานและจุดประสงค์ในการทดสอบก็จะแตกต่างกันไปอีก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงประเภท, ขนาดและมาตรฐานที่กำหนดในการทดสอบชิ้นงาน

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

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบชิ้นงานมาตรฐานประเภท A ซึ่งจะมีการทดสอบตำแหน่งโดยการเจาะรูทั้งหมด 5 รู ในขนาดที่แตกต่างกัน และเพื่อที่จะตรวจสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแบบหลากหลายเงื่อนไข เช่น การเดินเส้นตรงและการเดินเป็นวงกลม

TNI



รูปที่ 3.2 ภาพตัดด้าน Z-Z

โดยอุปกรณ์ที่ใช้กัดชิ้นงานมาตรฐานดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 เป็นดังนี้

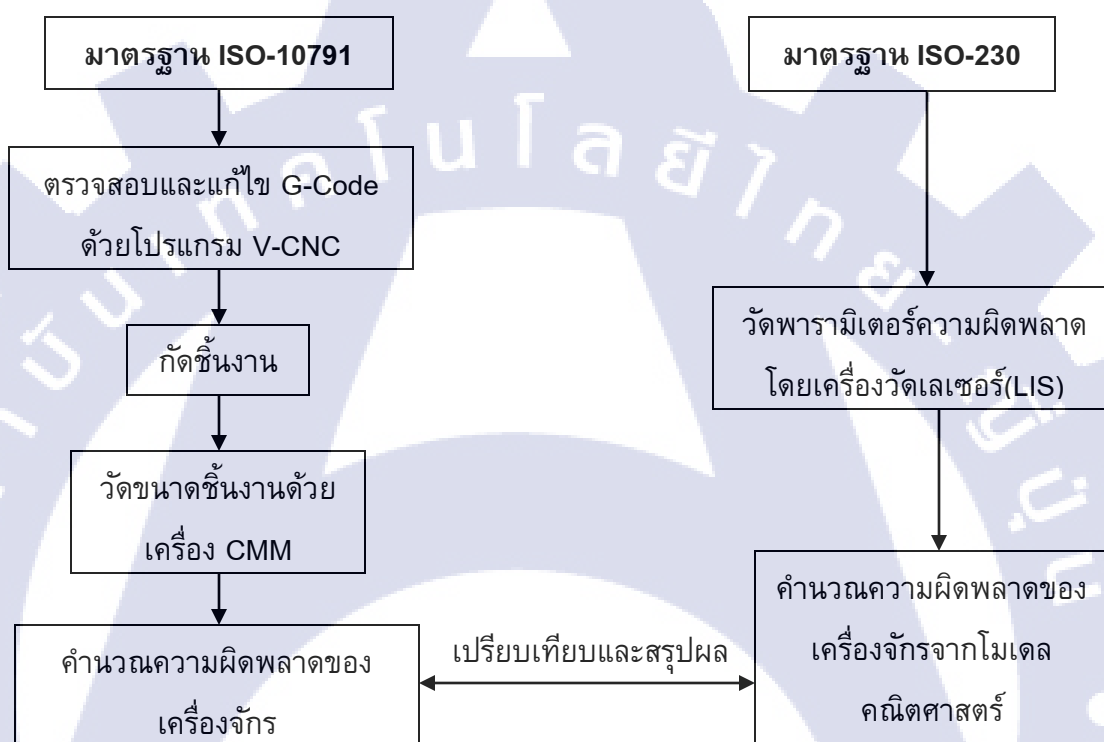
1. ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm
2. ดอกกัด End Mill เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm
3. ดอกสว่าน เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm

หลังจากกัดชิ้นงานมาตรฐานเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานมาตรฐานมาวัดด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน (CMM, Mitutoyo Cryta Apex Series) โดยจะวัดเป็นจุด แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ISO-230

สำหรับมาตรฐาน ISO-230 เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการติดตั้งและวิธีการเก็บค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดจากเครื่องวัดต่างๆ ซึ่งในมาตรฐาน ISO-230 นี้ได้ระบุวิธีการเก็บค่าด้วยเครื่องวัดเลเซอร์ไว้ด้วย ดังนั้นการเก็บค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดทั้ง Linear error และ Scale error ด้วยเครื่องวัดเลเซอร์จึงกระทำตามมาตรฐาน ISO-230 ซึ่งเงื่อนไขการเก็บค่าได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

เมื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ความผิดพลาดของเครื่องจักรตามมาตรฐาน ISO-230 แล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความผิดพลาดโดยใช้โมเดลคณิตศาสตร์ของเครื่องจักร CNC, Makino S33 ดังที่กล่าวไปในบทที่ 2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อคำนวณค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรจากโมเดลคณิตศาสตร์แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 แล้วดำเนินการสรุปผลต่อไป โดยแผนการดำเนินงานนั้นจะเป็นดังรูปที่ 3.3



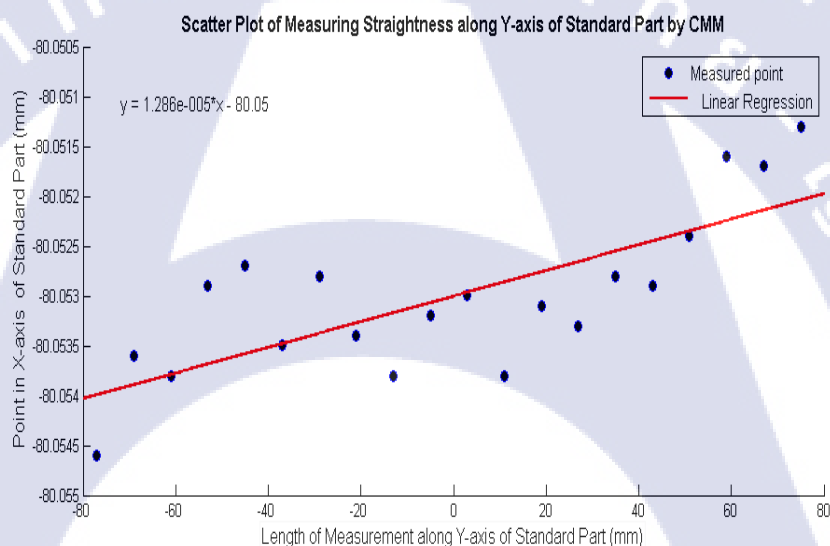
รูปที่ 3.3 แผนการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวัดชิ้นงานมาตรฐาน ISO-10791 ด้วยเครื่อง CMM

จากการวัดชิ้นงานมาตรฐานตามการกั้ตชิ้นงานของเครื่องกัด CNC ในแนวแกน Y ด้วยเครื่องวัดขนาดแบบ 3 แกน (CMM) ผลที่ได้ออกมาจากเครื่อง CMM นั้นอยู่ในรูปของจุดพิกัดตามระบบพิกัด Cartesian จากนั้นนำข้อมูลเหล่านั้นมาพล็อตแผนภาพการกระจายของข้อมูลและทำ Linear Regression เพื่อหาค่า Straightness Error ในแนวแกน Y จากชิ้นงานมาตรฐานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการกระจายและ Linear Regression ของข้อมูล

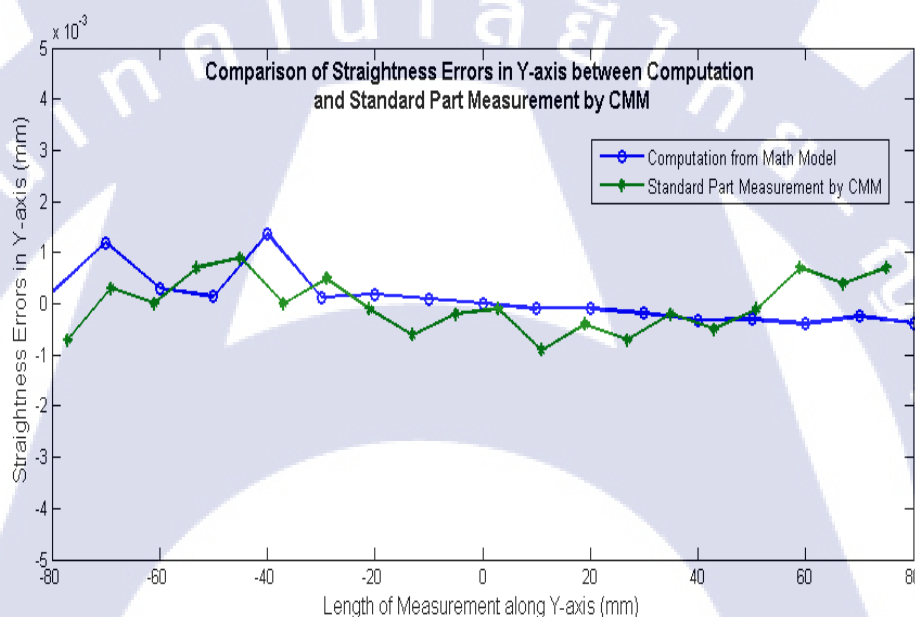
จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนภาพการกระจายแล้วคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนของจุดพิกัดในแนวแกน X จากเส้น Linear Regression ก็จะได้เป็นค่า Straightness Error ในแนวแกน Y สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณจากสมการที่ (21)เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการคำนวณระหว่างการคำนวณค่าStraightness Error ตามแนวแกน Y โดยใช้สมการที่ (21)กับการวัดและคำนวณจาก CMM

Point of Measurement in Y-axis (mm)	Straightness Error in Y-axis (mm)	
	Mathematical Model	CMM
-80	0.000216	0.0003
-70	0.00196	0
-60	0.0003	0.0007
-50	0.00014	0.0009
-40	0.00136	0
-30	0.00012	0.0005
-20	0.00018	-0.0001
-10	0.0001	-0.0006
0	0	-0.0002
10	-0.0001	-0.0001
20	-0.0001	-0.0009
30	-0.00018	-0.0004
40	-0.00032	-0.0007
50	-0.0003	-0.0002

60	-0.0004	-0.0005
70	-0.00024	-0.0001
80	-0.00038	0.0007

จากตารางที่ 4.1 สามารถพล็อตกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.2 ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าStraightness Error แนวแกน Y ระหว่างใช้สมการ (21) กับการวัดและคำนวณโดยใช้ CMM

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยใช้สมการที่ (21) หรือค่าตำแหน่งที่ผิดพลาดในแนวแกน X เมื่อเทียบกับแกน Y (ค่า ΔX ในสมการที่ (21)) ที่เกิดจาก Geometric Error มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่า Straightness Error ในแนวแกน Y ที่วัดได้จาก CMM ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่า Geometric Error ของตำแหน่งที่ผิดพลาด (ISO-230) ที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์สามารถประมาณค่า Straightness Error ที่วัดจากชิ้นงานมาตรฐาน (ISO-10791)

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การคำนวณค่าตำแหน่งที่ผิดพลาดที่เกิดจาก Geometric Errors โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเรื่องที่ยากในทางปฏิบัติที่จะทำได้ในโรงงาน อีกทั้งการวัดพารามิเตอร์ความผิดพลาดทั้งหมด 18 ตัว โดยเครื่องวัดเลเซอร์จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญภายนอกอีกด้วย

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการ ISO-10791 ด้วยการวัดชิ้นงานมาตรฐานด้วยเครื่อง CMM นั้น ค่า Straightness Error ที่คำนวณได้จากเครื่อง CMM สามารถประมาณค่าได้จากการคำนวณค่าตำแหน่งที่ผิดพลาดที่เกิดจาก Geometric Errors โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

TNI

Error Parameters of Milling Machine by Measurement of Machined Parts

Pimpet Sratong-on^{#1}, Lerkiat Vongsarnpigoon[#], Warakom Nerdnoi[#], Wiroj Thasana[#]

[#]Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattanakarn Rd., Suan Luang, Bangkok 10250, Thailand
¹pimpet@tni.ac.th

Abstract— Quality of machined parts depends on the accuracy of machine movements in machining processes. In order to improve accuracy of machined parts, all parameters of geometric error of machine movement must be characterized and compensated. A mathematical error-model of 3-axes Vertical Milling Machine Center was derived from a model of imperfect motion of a rigid body. The error-dimensions of the machined part that may affect to each error-parameter were measured by Coordinate Measurement Machine. The errors parameters were then analyzed from those error-dimensions. Then, direct measurement of error parameters were measured by Laser Interferometer System according to the ISO-230 standard. These measured parameters are compared to the analyzed error parameter.

Keywords— Geometric error, vertical milling machine, coordinate measurement machine, Laser Interferometer System, machining processes

I. INTRODUCTION

Precision and accuracy play an important role in industry in order to get acceptable quality of machined parts. Therefore, calibration is necessary for machines or tools. Laser Interferometer System (LIS) is a nanometrological device used to examine and calibrate a machining center. Unfortunately, LIS and calibration process increase overall cost and manufacturing time. This paper proposes a methodology of using Coordinate Measurement Machine (CMM) in ISO-10791 to examine the error parameters of Vertical Milling Machine Center (VMC, Makino S33) comparing the results with those from LIS and mathematical model base on kinematics of VMC in ISO-230.

Error parameters of machine originate from various causes, e.g. geometric errors, thermal errors, force errors and dynamic errors, etc. Geometric errors occur from wear or stress of the assembled parts and the imperfect structures of the machine. Previous study suggested that 70% of geometric errors led to the inaccuracy and imprecision of machined part [1].

Geometric errors have 21 parameters in a 3-axis machine, e.g. scale errors, straightness errors, angular errors and squareness errors. Mathematical model using Homogeneous Transformation Matrix (HTMs) of VMC has been suggested to compute and compensate those errors.[1]. [2] Laser

Interferometer Tracking System (LITS) was used to measure translational and also angular errors of a multi-axis machine. It was found that LITS could measure most of geometric error parameters precisely. However, LITS had high cost and was very time consuming to install and align. Generally, when testing the accuracy of machine tools by LIS or other similar devices, technicians often follow ISO-230 (Standard of method for testing the accuracy of machine tools) to examine and collect error parameters. However, due to the number of data and long processing time of ISO-230, ISO-10791(Test condition for machining center) is also used.

II. THEORY

A. Overview of Machine Error Parameters

Geometric error parameters of machine have two main components: linear error parameters and angular error parameters. Linear error parameters comprise of scale error which occurs when the machine moves along the moving axis and two parameters in the direction perpendicular to scale errors called straightness errors. Angular errors occur from rotational movement of the machine called roll, pitch and yaw. Also, squareness errors occur between two faces of a machined part. Fig. 1 demonstrates geometric parameter errors of a three-axis VMC which is moving in X-axis.

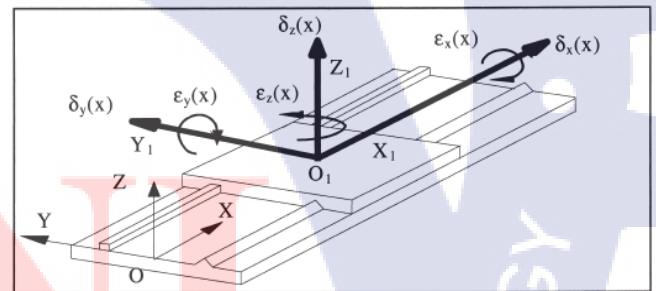


Fig.1 Schematic of geometric parameter errors of 3-axes VMC's X-carriage system

The symbols in Fig.1 are as follows:

- O_RXYZ : Reference frame coordinate of the VMC
- $O_1X_1Y_1Z_1$: Carriage coordinate system (X-axis)
- $\delta_x(x)$: Scale error in X-axis
- $\delta_y(x)$: Horizontal straightness error along Y-axis
- $\delta_z(x)$: Vertical straightness error along Z-axis
- $\epsilon_x(x)$: Rotational error about X-axis (roll)

$\varepsilon_y(x)$: Rotational error about Y-axis (pitch)

$\varepsilon_z(x)$: Rotational error about Z-axis (yaw)

Subscripted letters represent the axe that the error occurs and letters in parentheses represent the intended motion directions. Table 1 summarizes the number of error parameters of 3-axes VMC including squareness errors.

TABLE I
TOTAL COMPONENTS OF GEOMETRIC ERROR PAREMETERS OF 3-AXES VMC

	Error Parameters
Scale error	3
Straightness error	6
Angular error	9
Squareness error	3
	Total = 21

B. HTM and Mathematical Model of VMC Makino, S33

A multi-axis machine is assembled by joints and linkages of its carriage system. Coordinates of a cutting point relative to the reference frame of the machine can be computed by rigid body kinematics and modeled by HTM. A HTM is a 4x4 matrix and can be used to represent one coordinate system with respect to another reference coordinate system. When the machining center moves from coordinate (x, y, z) of frame O_R to (x', y', z') of frame O_N in X-carriage system, translation of a, b and c units in X, Y and Z-axis, respectively, occur [3,5]. Scale and straightness errors occur and error matrix of the translation can be expressed as,

$$\mathbf{E}_{trans} = \begin{bmatrix} x + a + \delta_x(x) \\ y + b + \delta_y(x) \\ z + c + \delta_z(x) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

where a, b and c are the offset distances between frame O_R and O_N , respectively.

The rotation, if any, from (x, y, z) coordinate to (x', y', z') can be described in terms of the angles of rotation from (x, y, z) to (x', y', z') . Assuming infinitesimal angles of rotation and denoting the errors by $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ and ε_z , the rotation errors matrix can be written as

$$\mathbf{E}_{rot} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & 0 \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & 0 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Combining both translational errors and rotational errors results in the matrix of total errors

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{rot} \mathbf{E}_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & x + a + \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & y + b + \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & z + c + \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

C. Mathematical Model of Errors for VMC, Makino S33 Machine

To specify nominal position of any point in space, the reference frame must be chosen. The schematic layout is illustrated in Fig.2 of VMC, Makino S33.

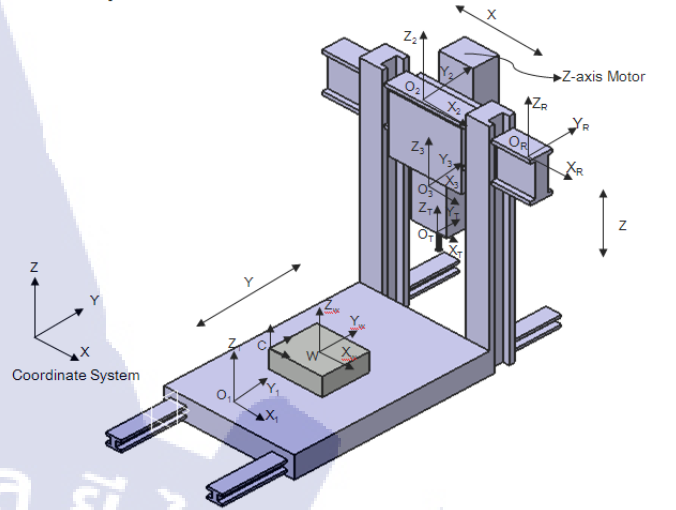


Fig.2 Schematic layout of VMC, Makino S33

At table, if machine has no any geometric errors, the ideal position of frame W (Work Piece frame) with respect to O_1 (table frame) is given by the transformation matrix,

$${}^{O_1}T_W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

where a_1, b_1 and c_1 are offset distances in X, Y and Z-axis, respectively. However, the position of frame O_1 with respect to the reference frame of machine R frame is given by

$${}^R T_{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{R1} \\ 0 & 1 & 0 & b_{R1} \\ 0 & 0 & 1 & c_{R1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

a_{R1}, b_{R1} and c_{R1} are offset distances in X, Y and Z-axis. Thus, ideal position of frame W with respect to the reference frame of the machine is given by the transformation matrix.

$${}^R T_W = [{}^R T_{O_1} {}^{O_1} T_W] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 + a_{R1} \\ 0 & 1 & 0 & b_1 + b_{R1} \\ 0 & 0 & 1 & c_1 + c_{R1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Therefore, if the frame C (Cutting point frame) contains point $P_c = (p_x, p_y, p_z)$, The ideal position of P_c respect to the reference frame of the machine is

$$P_{ideal} = {}^R T_W P_c = \begin{pmatrix} a_1 + a_{R1} + p_x \\ b_1 + b_{R1} + p_y \\ c_1 + c_{R1} + p_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

However, the actual position of frame C has geometric error parameters and the transformation matrix turns out to be,

$${}^{O_1}T_{W_actual} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & a_1 + \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & b_1 + \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & c_1 + \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Instead of (6), the actual transformation matrix is

$${}^R T_{W_actual} = \begin{bmatrix} {}^R T_{O_1} & {}^{O_1} T_w \end{bmatrix}$$

$${}^R T_{W_actual} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & a_1 + a_{R1} + \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & b_1 + b_{R1} + \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & c_1 + c_{R2} + \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

The actual position at the table of point P_c with respect to the reference frame of the machine will then be

$$P_{actual} = {}^R T_{W_actual} P_c$$

$$P_{actual} = \begin{bmatrix} a_1 + a_{R1} + \delta_x + p_x - \varepsilon_z p_y + \varepsilon_y p_z \\ b_1 + b_{R1} + \delta_y + p_y + \varepsilon_z p_x - \varepsilon_x p_z \\ c_1 + c_{R1} + \delta_z + p_z - \varepsilon_y p_x + \varepsilon_x p_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Consequently, errors positions occurring in the table are

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = P_{actual} - P_{ideal} = \begin{bmatrix} \delta_x - \varepsilon_z p_y + \varepsilon_y p_z \\ \delta_y + \varepsilon_z p_x - \varepsilon_x p_z \\ \delta_z - \varepsilon_y p_x + \varepsilon_x p_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

III. EXPERIMENT

A. Standard Part from ISO-10791

As specified in ISO-10791 the side view and top view of a standard part used to test machining center are shown in Fig.3a and Fig.3b.

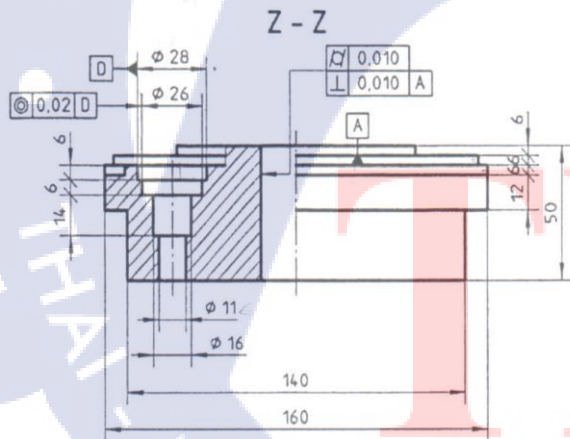


Fig. 3a. Side view of standard part

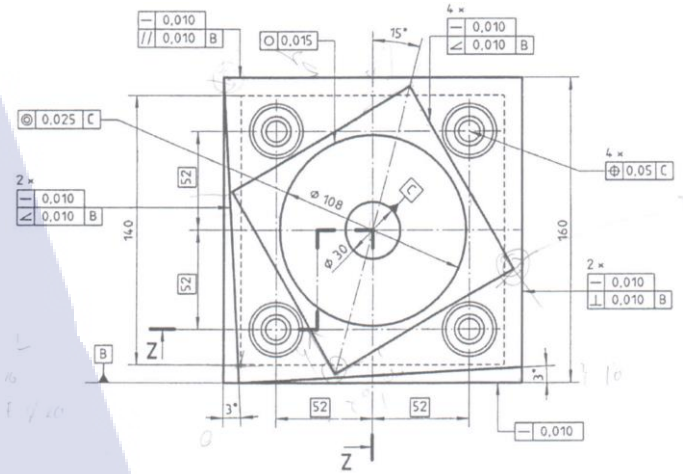


Fig. 3b. Top view of standard part

Examination of G-Code of the standard part in ISO-10791 was carried out by using Virtual CNC (V-CNC) program [4]. Aluminum was chosen as the material to be machined. After machining, the standard part was measured, by CMM and straightness errors were calculated from MATLAB.

B. Measurement of VMC Makino, S33's Motion

LIS was used to measure scale error, pitch and yaw errors of the Y-axis. The machine was programmed to move within the length of a standard part in the Y-axis after installation and alignment of LIS. Scale error of Y-axis was measured at interval of 10 mm from -100 to 100 mm and in the forward and in backward directions. Similarly, pitch and yaw errors were collected data along the same length. As specified in ISO-230, the machine measured by LIS has to run and collect data at least 5 times in forward and backward directions. Machine errors were computed from the collected data by (11). Since straightness errors in the Y-axis are the deviation of points in the X-axis, using the average values of Δx were compared with measurement from the standard part by CMM.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A CMM (Mitutoyo Crysta Apex Series) was used to measure straightness in the Y-axis of the standard part. The data of points in X and Y-axis were collected and, MATLAB was used to do linear regression and calculate straightness errors. Fig. 4 shows the points in X-axis measured by CMM while the length of measurement is from -80 to 80 mm along Y-axis.

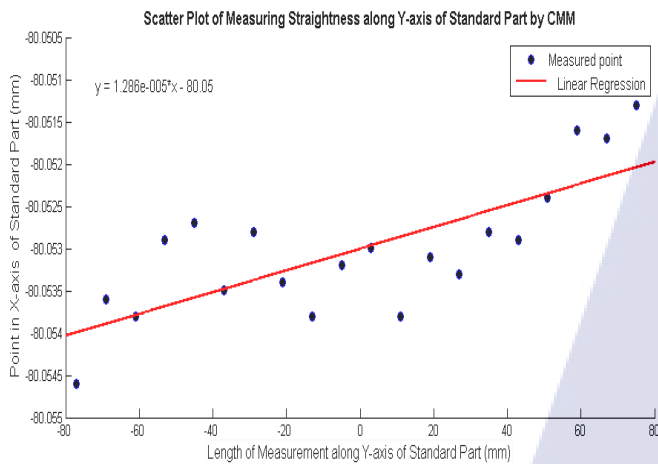


Fig.4 Scatter plot of measuring straightness errors along Y-axis of standard part by CMM

Straightness errors in the Y-axis are simply the deviations of scattered points from the linear regression line.

The straightness errors from CMM measurement of the standard part and from LIS measurement through (11) are shown in Table 2, and plotted in Fig.5.

TABLE II
STRAIGHTNESS ERRORS IN the Y-AXIS FROM the
MATHEMATICAL MODEL and CMM

Point of Measurement in Y-axis (mm)	Straightness Error in Y-axis (mm)	
	Mathematical Model	CMM
-80	0.000216	0.0003
-70	0.00196	0
-60	0.0003	0.0007
-50	0.00014	0.0009
-40	0.00136	0
-30	0.00012	0.0005
-20	0.00018	-0.0001
-10	0.0001	-0.0006
0	0	-0.0002
10	-0.0001	-0.0001
20	-0.0001	-0.0009
30	-0.00018	-0.0004
40	-0.00032	-0.0007
50	-0.0003	-0.0002
60	-0.0004	-0.0005
70	-0.00024	-0.0001
80	-0.00038	0.0007

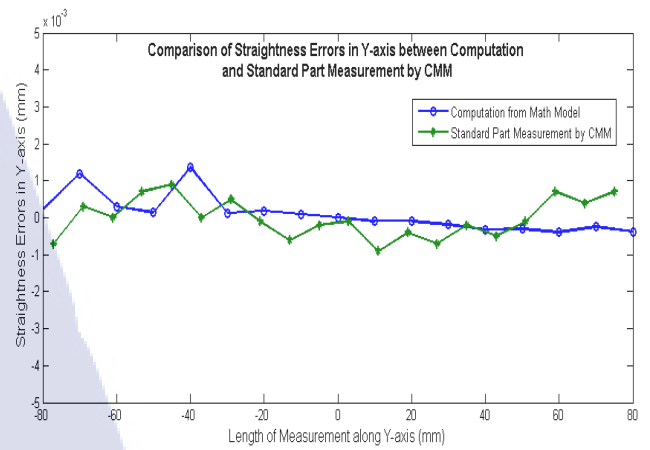


Fig.5 Comparison of straightness errors in Y-axis between mathematical model and standard part measurement by CMM

As seen in Fig.5, straightness errors from the mathematical model were smaller than those measuring by CMM. Nevertheless, both had the same. It was clear that using CMM measuring of a standard part according to ISO-10791 could predict straightness errors of the motion of the machine in the Y-axis.

V. CONCLUSION

Calculation of geometric errors from a mathematical model is known to be impractical for a typical manufacturer for industry. An alternative method that can examine a machine is by measuring a machined part using CMM.

It can be seen in this paper that measurement of a standard part in ISO-10791 can estimate the straightness errors in the Y-axis similar to measuring scale and angular errors by LIS and then calculation by HTM. Using CMM inspection the machine errors can reduce cost and time in maintenance and manufacturing processes.

ACKNOWLEDGMENT

The author would like to express her thanks to National Institute of Metrology (Thailand) and Calibratech Co., Ltd. who support LIS and other materials for conduction this research.

REFERENCES

- [1] A. C. Okafor and Yalcin M. Ertekin, "Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics", *Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 1199-1213, Nov.1999.
- [2] Nerdnoi W., Vongsarnpigoon L., Liu X. and Harb S., "3-D Cartesian Co-ordinate Laser Interferometer Tracking System," in *Proc. 13th National Mechanical Engineering Conference*, 1999.
- [3] D. N. Reshetove and V. T. Portman, *Accuracy of Machine Tools* 1st ed., New York, USA: ASME, 1988.
- [4] Cubictek V-CNC , POSH Enterprise, 2010.
- [5] (2005)Rowan University website. [Online].Available: www.rowan.edu



ประวัตินักวิจัย / ที่ปรึกษา / ผู้เชี่ยวชาญ
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

(กรุณารอกข้อมูลให้ครบทั้ง 6 ส่วน โดยสามารถเพิ่มช่องกรอกข้อมูลได้)



ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

- 1.1 ชื่อ (นาย / นาง / นางสาว).....วิโรจน์.....นามสกุลทศนะ.....
First Name (Mr / Mrs / Ms) Wiroj..... Last Name Thasana.....
- 1.2 วัน/เดือน/ปี เกิด (พ.ศ)...11/01/2519.....อายุ35..... ปี เพศ ☒ ชาย ☐ หญิง
- 1.3 เชื้อชาติไทย..... สัญชาติไทย.....ศาสนา.....Buddha.....สถานภาพMarried.....
เลขบัตรประจำตัวประชาชน3310101375257.....
- 1.4 ที่อยู่ปัจจุบัน (บ้าน)
.....14/47 หมู่บ้านมณีตย์เมืองใหม่ ต.ชุมเห็ด อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000.....
.....
โทรศัพท์บ้านโทรศัพท์มือถือ ...086-8677702...โทรสารE-mail : ...wiroj@tni.ac.th , wirojteen@hotmail.com...
สถานที่ทำงาน ชื่อหน่วยงาน
.....สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.....
..... 1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250.....
โทรศัพท์ ...0-2763-2600 Ext.2904.....โทรสาร ...0-2763-2600 Ext.2900.... E-mail : wiroj@tni.ac.th
- 1.5 ตำแหน่งปัจจุบันรักษาการประธานหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต.....
- 1.6 ตำแหน่งทางวิชาการไม่มี.....

ส่วนที่ 2 ประวัติการศึกษาและวิชาการ

2.1 ประวัติการศึกษา

- ปริญญาเอก ที่สถาบันคณะ.....
สาขาวิชาปีที่เข้า-จบการศึกษา
- ปริญญาโท ที่สถาบัน ... มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะ... วิศวกรรมอุตสาหการ.....
สาขาวิชาเครื่องกล.....ปีที่เข้า-จบการศึกษา2546 -2548.....
- ปริญญาตรี ที่สถาบันสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.....คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ.....ปีที่เข้า-จบการศึกษา2549-2550.....

วุฒิการศึกษาอื่น	คณะ/สาขาวิชา	สถาบัน	ปีที่เข้า-จบการศึกษา
1. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วิศวกรรมศาสตร์/ วิศวกรรมเครื่องกล	ม.เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2552-2554
2. High.Diploma.Tech.	ครุศาสตร์อุตสาหกรรม/ เครื่องมือกล	วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี	2541-2543
3. ศิลปศาสตรบัณฑิต	วิทยาการจัดการ/การจัดการทั่วไป(คอมฯธุรกิจ)	ม.ราชภัฏอุบลราชธานี	2542-2544

2.2 การเข้ารับการฝึกอบรม (เรียงตามลำดับจากปัจจุบัน)

- ชื่อหลักสูตร ... CAE for Plastic Injection with Moldex3D: CoreTech (Thailand) Co., Ltd.
เมื่อปี พ.ศ.2553...ระยะเวลา3....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... Creative Manufacturing Practices at Daido University, Nagoya Japan
เมื่อปี พ.ศ.... 2553... ระยะเวลา ...1.....เดือน
- ชื่อหลักสูตร ... Cimatron CAD/CAM ,Mold & Die Design: Saeilo (Thailand) Co., Ltd
เมื่อปี พ.ศ.... 2553... ระยะเวลา ...16.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... Metrology Practice : Mitutoyo (Thailand) Co., Ltd.
เมื่อปี พ.ศ.... 2552... ระยะเวลา ...8.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... CNC EDM & Wire Cut Practice: Mitsubishi Electric (Thailand) Co., Ltd
เมื่อปี พ.ศ.... 2552... ระยะเวลา ...8.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... Metal Forming Simulation with DynaForm : Thai-German Institute
เมื่อปี พ.ศ.... 2552... ระยะเวลา ...10....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... CNC Automatic Lathe of Citizen Machinery : Citizen Machinery (Thailand) Co., Ltd.
เมื่อปี พ.ศ.... 2552... ระยะเวลา ...8.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... ชื่อหลักสูตร ... Research Methodology : National Statistical
เมื่อปี พ.ศ.... 2551... ระยะเวลา ...3.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... Thermal Spraying: National Metal and Materials Technology Center.
เมื่อปี พ.ศ.... 2550... ระยะเวลา ...1.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... Part Design for CATIA: Mentel Co., Ltd.
เมื่อปี พ.ศ.... 2550... ระยะเวลา ...3.....วัน
- ชื่อหลักสูตร ... 4-Axis CNC Milling Programing: MTS Didactic SDN. Malaysia.
เมื่อปี พ.ศ.... 2549... ระยะเวลา ...5.....วัน

ส่วนที่ 3 ประวัติการทำงาน (เรียงลำดับจากปัจจุบัน)

- ชื่อหน่วยงาน.....สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น..... ตำแหน่งรักษาการประธานหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต.....
- ชื่อหน่วยงาน..... Triumph aviation Service Asia Co, Ltd ตำแหน่ง..... Engineer of Repair Product line.....
- ชื่อหน่วยงาน.....สถาบันไทย-เยอรมัน..... ตำแหน่ง.....Engineer of Precision Machining.....
- ชื่อหน่วยงาน..... NK Mechatronics Co.Ltd ตำแหน่ง.....Engineer of Jig and Fixture Design.....
- ชื่อหน่วยงาน.....วิทยาลัยเทคนิคบุรีรัมย์..... ตำแหน่งอาจารย์.....
- ชื่อหน่วยงาน.....Charoong Thai Wire & Cable Pulic Co, Ltd ตำแหน่งTechnician.....



ส่วนที่ 4 ประสบการณ์ด้านการวิจัย

4.1 หัวข้อการวิจัยที่ถนัดหรือมีความเชี่ยวชาญ

1. หัวข้อ..... CNC Machining Process /Both Theoretical and Hand On.....
2. หัวข้อ.....Jig & Fixture Design.
3. หัวข้อ..... Mold & Die Design and Making
4. หัวข้อ..... CAD/CAM.....
5. หัวข้อ..... Machine Design.....

4.2 ผลงานทางวิชาการ หรือ ผลงานการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา (เรียงตามลำดับจากปัจจุบัน)

1. ชื่อเรื่อง ...การออกแบบและสร้างเครื่องทอเสื้อก.....ปี พ.ศ 2550.....
2. ชื่อเรื่อง ...การออกแบบและสร้างเครื่องผ่านกล้วยเส้น.....ปี พ.ศ2547.....
3. ชื่อเรื่อง ...การออกแบบและสร้างเครื่องอัดเศษโลหะ.....ปี พ.ศ2542.....

4.3 การนำเสนอบทความทางวิชาการที่ผ่านมา

1. ชื่อเรื่อง จัดโดย ปี พ.ศ.....
2. ชื่อเรื่อง จัดโดย ปี พ.ศ.....
3. ชื่อเรื่อง จัดโดย ปี พ.ศ.....

4.4 งานทางวิชาการ หรือ งานวิจัยที่กำลังศึกษาอยู่ในปัจจุบันหรือสนใจจะทำในอนาคต

- 4.1 Sugimura, N., Watabiki, H., Niwa, Thasana, W., Iwamura, K., Tanimizu, Y., “ Analysis of Kinematic Motion Deviations of Rotary Tables Based on Geometric Tolerances” Proceedings of the ASME 2012 International Symposium on Flexible Automation ISFA 2012 June 18-20, 2012, St. Louis, MO, USA

- 4.2 Error Parameters of Milling Machine by Measured the Machined Part, International Conference on Business and Industrial Research ICBIR 2012, May 17-18, 2012, TNI, Thailand

- 4.3 Investigation of Machining Error in Aluminum Machining Considering the Cutting Force and Tool Rigidity

- 4.4 การจำลองพฤติกรรมการไหลของข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบกระแสนโดยระเบียบวิธีการคำนวณทางจลนพลศาสตร์(CFD), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2554

- 4.5 การออกแบบเครื่องผ่านกล้วยเส้น, วิทยานิพนธ์ครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547

ส่วนที่ 5 ประสบการณ์ด้านการบริการวิชาการ

5.1 การจดทะเบียนกับศูนย์ข้อมูลที่ปรึกษา กระทรวงการคลัง หรือหน่วยงานอื่น

☒ ยังไม่ได้จดทะเบียน

☐ จดทะเบียนแล้ว ประเภท หมายเลข
หน่วยงาน.....

5.2 ความเชี่ยวชาญเฉพาะทางในการเป็นวิทยากร / ที่ปรึกษา / ทดสอบและตรวจสอบผลิตภัณฑ์

- 5.2.1. หัวข้อ วิทยากรฝึกอบรมและที่ปรึกษาอุตสาหกรรม ด้าน CNC Machining และ Jig & Fixture เพื่อปรับปรุงและเพิ่มผลผลิต



ประวัตินักวิจัย / ที่ปรึกษา / ผู้เชี่ยวชาญ
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

5.3 หลักสูตรที่เคยเป็นวิทยากรอบรมให้กับบุคลากรภายนอก

- ชื่อเรื่องการอบรมเชิงปฏิบัติการ เทคโนโลยีการเขียนโปรแกรม CNC ด้วย Software CNC Simulation.....
จัดโดยสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)..... ปี พ.ศ.....2553.....
- ชื่อเรื่องFundamental of Jig&Fixture for Machining..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ...2549-2550
(ปีละ 3 ครั้ง).....
- ชื่อเรื่องงานเจียรระไน..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2550.....
- ชื่อเรื่องMachine Tool Theoty..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2550.....
- ชื่อเรื่องงานเจียรระไน..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2550.....
- ชื่อเรื่องBasic Cutting Process..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2550.....
- ชื่อเรื่องเทคนิคงานเครื่องมือกล..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2550.....
- ชื่อเรื่องCNC Milling..... จัดโดยสถาบันไทย-เยอรมัน..... ปี พ.ศ.....2549.....

5.4 ผลงานการเป็นที่ปรึกษา / ทดสอบและตรวจสอบผลิตภัณฑ์

- หัวข้อ.....การปรับปรุงและเพิ่มผลผลิต(กำลังดำเนินการอยู่)... ให้กับบริษัท... RX Manufacturing Co., Ltd..ปี พ.ศ....2554...
- หัวข้อ.....การทดสอบผลิตภัณฑ์ Sleeve..... ให้กับบริษัท..... PNT, Mechanic Co., Ltd.....ปี พ.ศ.....2553.....
- หัวข้อ.....วิทยากรอบรม โครงการ TMAP.....ให้กับบริษัท.....สถาบันยานยนต์.....ปี พ.ศ.....2555.....

5.5 ผลงานด้านการแปลหนังสือหรือบทความ

- ชื่อเรื่อง-..... จากภาษาเป็นภาษา.....ปี พ.ศ
2. ชื่อเรื่อง-..... จากภาษาเป็นภาษา.....ปี พ.ศ
3. ชื่อเรื่อง-..... จากภาษาเป็นภาษา.....ปี พ.ศ

5.6 อื่นๆ (ข้อมูลเพิ่มเติม).....

ส่วนที่ 6 คำรับรอง

☐ ขอรับรองว่าข้อมูลที่กรอกข้างต้นเป็นความจริง

ลงชื่อ

(.....)

วันที่/...../.....