ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ — **สาขา**

วิศวกรรมอุตสาหการ — **ภาควิชา**

เรื่อง การประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

An Application of for Ball Bar Five axis CNC Machine Static Error Compensation

นามผู้วิจัย นางสาวพัชรินทร์ วาดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

An Application of Ball Bar for Five axis CNC Machine Static Error Compensation

โดย

นางสาวพัชรินทร์ วาดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พัชรินทร์ วาดี 2555: การประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng. 64 หน้า

เครื่องจักรห้าแกนมีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนทางเรขาคณิตได้ ถ้าเครื่องจักรเกิดความผิดพลาดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน ความผิดพลาดที่ส่งผลต่อชิ้นงานคือความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ สำหรับเครื่องจักรชนิดห้าแกน ความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดของเครื่องจักรในแต่ละแกน ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงสามแกน และการหมุนรอบแกนสองแกน ดังนั้นถ้าแกนเลื่อนและแกนหมุนของเครื่องจักรเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน จะทำให้เกิดระยะทางระหว่างที่สามารถวัดได้ ซึ่งแกนเลื่อนใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดทางแสงที่วัดความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงของเครื่องจักรที่มีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือสูงสอบเทียบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงของเครื่องจักรก่อน และประยุกต์ใช้บอล-บาร์วัดระยะทางที่เกิดขึ้น ซึ่งระยะทางจะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการหมุนที่ผิดพลาดของเครื่องจักร และใช้หลักการทางเรขาคณิตวิเคราะห์เพื่อคำนวณมุมที่ผิดพลาดจากการหมุนที่ผิดพลาดของเครื่องจักร โดยทั่วไปจะใช้บอล-บาร์เพื่อวัดความกลมของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในระนาบสองมิติ เมื่อทราบความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ทุกองค์ประกอบแล้ว สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์และประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานเมื่อเครื่องจักรเกิดการเกิดการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดได้ และสามารถชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนรอบแกน A มีค่าลดลงร้อยละ 31.55 และ ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการหมุนรอบแกน C มีค่าลดลงร้อยละ 8.00

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Patcharin Wadee 2012: An Application of Ball Bar for Five axis CNC Machine Static Error Compensation. Master of Engineering (Industrial Engineering),
Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering.
Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 64 pages.

Five-axis CNC increases productivity in manufactures because the structure of five axis machines has two rotary axes. These rotary axes have also machining complicated shapes therefore high accuracy are required. The accuracy reduces by various errors. Static error is different of required position and actual position that can be represented distance between worktable and machine tool that were produced by motion error of machine. That is translational error occurred in linear axis and angular error from rotational axis. Translational error has high precision device to measure. In this research, laser interferometer is used for calibrated linear position of the machine. Ball Bar is effective device which wildly used to measured circular of machine. It measure angular motion error by consider the difference radius of circular movement. A proposed mathematical model is considered to calculate the rotational error of A and C axis by Ball Bar measuring results. After compensation, the experiment has demonstrated that the proposed method improves accuracy of rotary axis CNC machine. The result shown after compensation, rotational error about A-axis was reduced 31.55 % and rotational motion error about C-axis was reduced 8.00 %.

_____ / / _____

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อาจารย์ ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณกรรมการที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล และรองศาสตรจารย์ ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา รวมทั้งอาจารย์ภูมเรศ แสงราม และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณคุณกฤติยา พาอิ่ม คุณชัชวาล โรจนประทีป คุณบพิธ ฉุยฉาย ครอบครัว พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งความรู้ทางเทคนิค ทางปฏิบัติและให้กำลังใจส่งผลให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วง

และความดีหรือประโยชน์อันใดที่เกิดจากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้ให้ความกรุณาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

พัชรินทร์ วาดี

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	1
สารบัญตาราง	2
สารบัญภาพ	3
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	5
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	32
ผล	32
วิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	39
สรุป	39
ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก ผลการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	46
ภาคผนวก ข ผลการวัดด้วยบอล-บาร์	52
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณค่ามุมที่ผิดพลาด	59
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	64

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนตามแนวแกน X Y และ Z	34
2	ค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน A (dA)	35
3	ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C (dC)	36

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพของระบบ Linear Differential Transformation	4
2	เทคนิคไมเกลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ กระจก M1 จะถูกติดให้อยู่กับที่ กระจก M2	5
3	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 2-0 machine	6
4	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 1-1 machine	7
5	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 0-2 machine	7
6	ความผิดพลาดทางตำแหน่ง (Positioning Error)	9
7	เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนที่ใช้ในการทดลอง	17
8	ชุดอุปกรณ์บอล-บาร์ Renishaw Ball Bar QC10	17
9	การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	20
10	การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	21
11	การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	21
12	การติดตั้งบอล-บาร์กับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนเพื่อการวัดค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C เมื่อมองจากด้านหน้า (Front View)	22
13	ภาพแบบจำลองทางเรขาคณิตวิเคราะห์ เพื่อคำนวณค่าความผิดพลาจากการหมุนรอบแกน C	23
14	การติดตั้งบอล-บาร์กับเครื่องจักรเพื่อวัดค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกนA เมื่อมองจากด้านหน้า (Front view)	25
15	ภาพแบบจำลองทางเรขาคณิตวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน A มองจากด้านข้าง (Side View)	25
16	โครงสร้างของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนชนิด 2-0 machine	27
17	แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน X	32
18	แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน Y	33
19	แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน Z	34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แผนภูมิค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A ก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด	35
21	แผนภูมิค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน C ก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด	36
22	แผนภูมิเส้นทางเดินของเครื่องจักรที่เกิดความผิดพลาดของการหมุนก่อนการชดเชยค่าความผิดพลาด	37

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

$dx_{\mathbf{m}}$ = ความผิดพลาดในการเลื่อนในแนวเส้นตรงตามแกน X ของเครื่องจักร

dy_{m} = ความผิดพลาดในการเลื่อนในแนวเส้นตรงตามแกน Y ของเครื่องจักร

dz_{m} = ความผิดพลาดในการเลื่อนในแนวเส้นตรงตามแกน Z ของเครื่องจักร

dA = ความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน X ของโต๊ะวางชิ้นงานของเครื่องจักร

dC = ความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน Z ของโต๊ะวางชิ้นงานของเครื่องจักร

dx_w = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X ที่ชิ้นงาน

dy_w = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y ที่ชิ้นงาน

dz_w = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z ที่ชิ้นงาน

di = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดฉากสามมิติที่ขนานกับแกน X ซึ่งแสดงถึงทิศทางระหว่างสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงาน

dj = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดฉากสามมิติที่ขนานกับแกน Y แสดงถึงทิศทางระหว่างสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงาน

dk = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดฉากสามมิติที่ขนานกับแกน Z แสดงถึงทิศทางระหว่างสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

A-axis = แกนหมุนรอบแกน X

C-axis = แกนหมุนรอบแกน Z

Tij = สมการการแปลงเอกพันธุ์ของกรอบอ้างอิง *j* เทียบกับกรอบอ้างอิง *i*

เมื่อ $i = 0$ ถึง 5 และ $j = 1$ ถึง 6

Trans(x,y,z) = เมทริกซ์การแปลงอนุพันธุ์แบบเลื่อนในแนวแกน X Y และ Z

เทียบกับกรอบอ้างอิงในระบบพิกัดฉากสามมิติ

Rot(x, θ) = เมทริกซ์การแปลงอนุพันธุ์การหมุนรอบแกน X ด้วยมุม θ

เทียบกับกรอบอ้างอิงในระบบพิกัดฉากสามมิติ

Rot(y, θ) = เมทริกซ์การแปลงอนุพันธุ์การหมุนรอบแกน Y ด้วยมุม θ

เทียบกับกรอบอ้างอิงในระบบพิกัดฉากสามมิติ

Rot(z, θ) = เมทริกซ์การแปลงอนุพันธุ์การหมุนรอบแกน Z ด้วยมุม θ

เทียบกับกรอบอ้างอิงในระบบพิกัดฉากสามมิติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

An Application of Ball Bar for Five axis CNC Machine Static Error Compensation

คำนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ได้ถูกออกแบบให้มีความซับซ้อนและต้องการขนาดของชิ้นงานให้มีความถูกต้อง ตลอดจนมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ได้ขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ ในอุตสาหกรรมยานยนต์จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องการชิ้นงานที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่ก็มีความจำเป็นที่ต้องผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างพอเพียง ดังนั้นเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตที่ต้องการความแม่นยำและกำลังการผลิตที่มีความสามารถสูง เครื่องจักรซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน มีความถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งยังสามารถที่จะผลิตได้ในปริมาณที่มาก เมื่อเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม ถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง เครื่องจักรจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงกับค่าความถูกต้องของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีขนาดผิดพลาดจากกำหนดไว้ ยิ่งใช้เครื่องจักรมาก ก็ยิ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้มาก ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องจักรอยู่ตลอดเพื่อที่จะลดความผิดพลาดในการผลิตและทำให้จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ และยังสามารถช่วยลดกระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์จากเครื่องจักรนั้นๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อชิ้นส่วนของเครื่องจักรลง เพราะกระบวนการตรวจสอบคุณภาพเป็นกระบวนการที่ไม่เพิ่มมูลค่า งานวิจัยจึงประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน โดยปรับเทียบแกนเลื่อนของสปินเดิลทูลทั้ง 3 แกนให้ถูกต้องโดยการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง จากนั้นค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นจากการหมุนที่ผิดพลาดของโต๊ะหมุนวางชิ้นงานเท่านั้นซึ่งสามารถวัดได้โดยบอล-บาร์ และค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด สามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อออกแบบกระบวนการการผลิตในอุตสาหกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา คือ

1. เพื่อศึกษาค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนของแกนหมุนทั้งสองของเครื่องจักรชนิดห้า แกนโดยใช้บอล-บาร์วัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนรอบแกนของแกน A และ C

2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรและค่าความผิดพลาดของชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

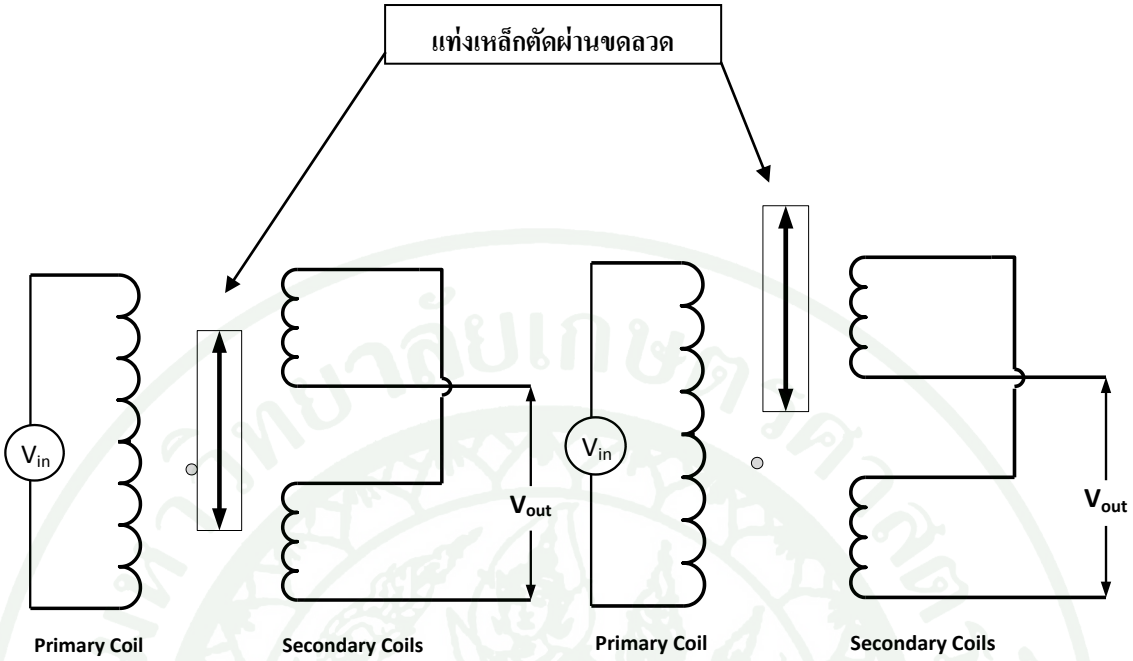
การวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน ต้องศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิจัยซึ่งมีหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. บอล-บาร์
2. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์
3. เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน
4. ความผิดพลาดของเครื่องจักร
5. สมการโฮโมจีเนียสทรานสฟอร์เมชั่น (Homogeneous Transformation Model)
6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จาโคเบียน (Jacobian Model)
7. การชดเชยความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

1. บอล-บาร์ (Ball-Bar)

บอล-บาร์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดตำแหน่งของเครื่องจักรโดยการเดินเป็นวงกลม ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง 2 แกน ในระนาบอ้างอิงของเครื่องจักรตามมาตราฐาน ISO 230 (ISO, 2005; Mekid,2008) บอล-บาร์ประกอบด้วย Pivot Assembly สำหรับติดที่โต๊ะวางชิ้นงาน มีลักษณะเป็นแม่เหล็ก Tool Cup สำหรับติดที่สปินเดิลทูลของเครื่องจักร มีลักษณะการทำงานคือ ในแท่งของบอล-บาร์นั้นบรรจุเซ็นเซอร์ชนิด Linear Variable Displacement Transformer : LVDT สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นเป็นสัญญาณไฟฟ้า ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิ 1 ขด และขดลวดทุติยภูมิ 2 ขด มีแกนตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อแกนเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงผ่านขดลวด จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันทำให้ (ภาพที่1) และคอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลกลับมาเป็นข้อมูลในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ (ภูมเรศ, 2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 แผนภาพของระบบ Linear Differential Transformation

2. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Laser Interferometer)

งานวิจัยนี้ใช้ระบบการวัดทางแสงคือเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูงในการวัดระยะทางขนาดกลาง (สุรพล, 2544) วัดความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Linear Translational Error) เพื่อปรับเทียบให้การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทั้ง 3 แกน เคลื่อนที่ถูกต้อง

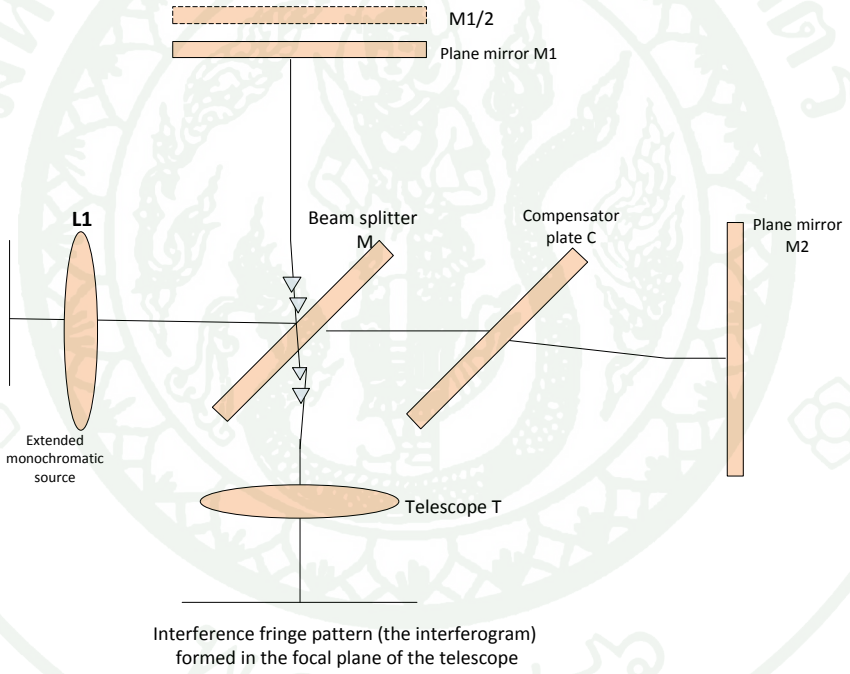
2.1. ไมเกลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

หลักการพื้นฐานของไมเกลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ คือ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเลนส์ L1 ทำให้เป็นแสงขนาน แสงจะตกกระทบบีมสปลิตเตอร์ M ซึ่งแสงบางส่วนจะทะลุผ่าน M และไปสะท้อนกลับที่ M2 จากนั้นสะท้อนที่ M แล้วเข้ากล้องโทรทัศน์ T แสงอีกลำแสงหนึ่งสะท้อนที่กระจก M มายังกล้องโทรทัศน์ T แสงอีกลำแสงหนึ่งสะท้อนที่กระจก M มายังกล้องโทรทัศน์ ลำแสงทั้งสองจะผ่านเข้ากล้องโทรทัศน์โดยมีสมบัติโคฮีเรนต์ เมื่อมีความแตกต่างเส้นทางเดินของแสงน้อยกว่าความยาวโคเฮียเรนต์ และทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดที่มองเห็นได้โดยกล้องโทรทัศน์และมีคอมเพนเซเตอร์ c เป็นแก้วหนาเท่ากับบีมสปลิตเตอร์ M เพื่อให้แน่ใจว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แขนของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เท่ากับทางแสง (Optically Equal) คือลำแสงทั้งสองลำมีความยาวการเดินทางในแนวแก้วเท่ากัน จึงทำให้แยกออกเท่าๆ กันทั้งสองแขน เราอาจจะถือได้ว่าริ้วการแทรกสอดเกิดขึ้นจากฟิล์มบางระหว่างอากาศ M1 และ M2 ซึ่งเป็นการสะท้อนของ M2 ใน M ดังนั้นถ้า M1 และ M2 ขนานกัน (นั่นคือ M1 และ M2 ตั้งฉากซึ่งกันและกัน) ฉะนั้นริ้ววงกลมของการแทรกสอดจะมีมุมเอียงเท่ากัน

ดังนั้นเราจะสามารถวัดระยะทางได้ด้วยการเคลื่อนที่ของกระจก M2 ในเทอมของการเลื่อนริ้วการแทรกสอด ในการวัดระยะทางที่ไม่ทราบ จะต้องจัดแนว M2 ให้ปลายด้านหนึ่ง และนับริ้วการแทรกสอดขณะที่กระจก M2 เคลื่อนที่ไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของระยะทางที่จะวัด



ภาพที่ 2 เทคนิคไมเกลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ กระจก M1 จะถูกติดให้อยู่กับที่ กระจก M2 สามารถเคลื่อนที่ในแนวของทิศ MM2 ริ้วการแทรกสอดจะปรากฏในฟิล์มอากาศระหว่างกระจก M1 กับ M2 ซึ่งภาพของ M2 ปรากฏในบีมสปริตเตอร์ แหล่งกำเนิดแสงแทนได้ด้วยแสงเลเซอร์และตัวขยายบีม

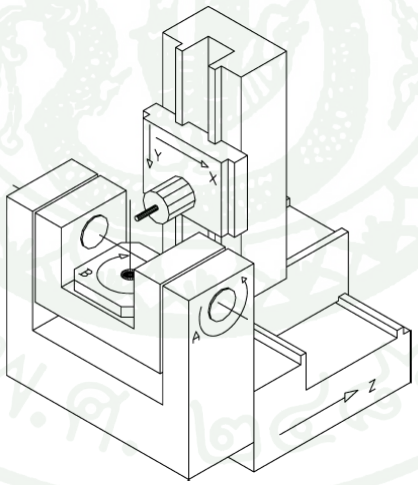
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

เครื่องจักรเอ็นซี (NC) หมายถึงเครื่องจักรที่ควบคุมอัตโนมัติโดยคำสั่ง ถูกสร้างขึ้นหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อการผลิตแบบสมัยใหม่ ต่อมาในยุค 60 เครื่องจักรนี้สามารถควบคุมได้โดยคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ จึงถูกเรียกว่า ซีเอ็นซี (CNC) หมายถึงเครื่องจักรที่ควบคุมได้โดยคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นคำสั่งเชิงตัวเลข (Computer Numerical Control)

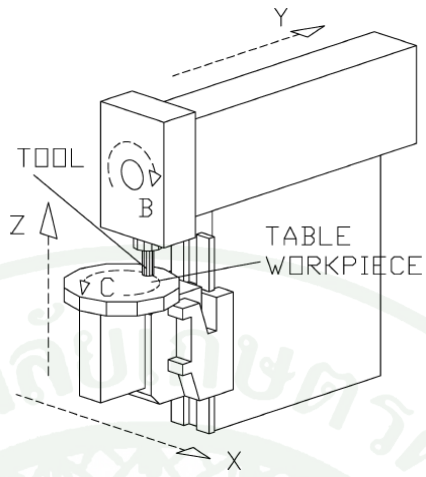
เครื่องจักรห้าแกนมีลักษณะทั่วไปคือ ประกอบด้วยแกนเลื่อน (Translational) 3 แกน และแกนหมุน (Rotational) 2 แกน จึงสามารถจำแนกเครื่องจักรห้าแกนได้จากลำดับการติดตั้งเครื่องมือและชิ้นงานได้ดังนี้ (Bohez, E. L. J., 2002)

1. 2-0 machine หมายถึงโต๊ะวางชิ้นงานสามารถหมุนได้ทั้ง 2 แกน
2. 1-1 machine หมายถึงโต๊ะวางชิ้นงานหมุนได้ 1 แกนและเครื่องมือหมุนได้ 1 แกน
3. 0-2 machine หมายถึงเครื่องมือหมุนได้ทั้ง 2 แกน

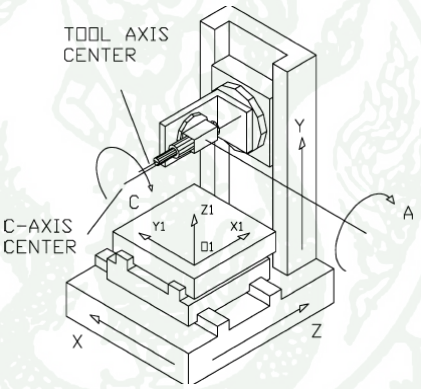


ภาพที่ 3 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 2-0 machine

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 1-1 machine



ภาพที่ 5 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิด 0-2 machine

ซึ่งเครื่องจักรซีเอ็นซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในจำพวก 2-0 machine ซึ่งพบว่า Geometric Error มีผลต่อ Positional Error น้อยมาก (Lamikiz, A. *et,al.*, 2008) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ (Static Error) ที่มีผลความผิดพลาดทางตำแหน่ง (Position Error) ซึ่งสามารถชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวได้ในซอร์ฟแวร์ (Software Compensation) โดยการสร้างเอ็นซี-โปรแกรม (NC-program) จาก CL-Data (Cutting Location) ซึ่งใช้สมการจลนพลศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematic Model) แก้ปัญหา (Rahman, M. *et,al.,* 2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน

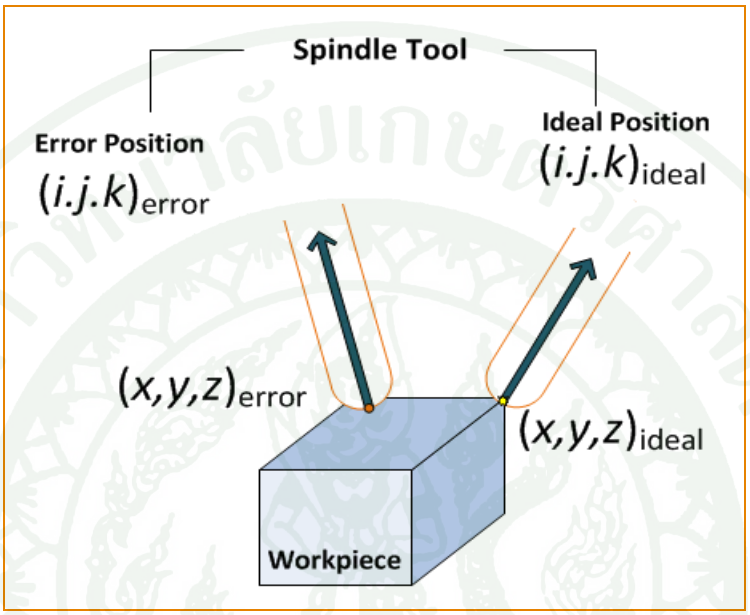
ความผิดพลาดพื้นฐานของเครื่องจักรความผิดพลาดของเครื่องจักรแบ่งเป็น 2 หมวดใหญ่ๆ คือ ความผิดพลาดเมื่อเครื่องจักรหยุดนิ่ง (Quasi-Static Error) เป็นแหล่งความผิดพลาดที่เกิดจากความสัมพันธ์ทางตำแหน่งระหว่างชิ้นงาน และอุปกรณ์ตัดเฉือน (Tool) สาเหตุของความผิดพลาดชนิดนี้ได้แก่ ความผิดพลาดทางด้านรูปร่างและโครงสร้าง (Geometric Error) ความผิดพลาดเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดของเครื่องจักร (Motion error) ความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะผลิต (Thermal Error) และความผิดพลาดแรงในการตัดเฉือนในกระบวนการการผลิต (Cutting-force Induce Errors) ความผิดพลาดขณะเครื่องจักรเคลื่อนที่ (Dynamic Error) สาเหตุหลักเกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ความผิดพลาดจากการหมุนของเพลา ความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องจักรหยุดนิ่งนั้นเกิดขึ้นประมาณ 70 % ของที่กล่าวมาทั้งหมด (พรชัย, 2554)

งานวิจัยนี้ศึกษาความผิดพลาดของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน ได้แก่ ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวแกนเลื่อน 3 แกนคือ X Y และ Z และความผิดพลาดของการหมุนของโต๊ะวางชิ้นงาน 2 แกนคือ A และ C ความผิดพลาดของเครื่องจักรที่กล่าวมานั้นก่อให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Positioning Error) ดังนั้นในการศึกษาความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรชนิดห้าแกน สามารถวัดได้จากตำแหน่งที่ผิดพลาดดังภาพที่ 6 กล่าวคือ เมื่อเครื่องจักรห้าแกนถูกสั่งให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่างๆ จะเกิดเวกเตอร์ (Vector) ระหว่างตำแหน่งของสปิลเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงาน (Work Table) ดังนั้นถ้าเครื่องจักรไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามคำสั่ง เวกเตอร์ที่เกิดขึ้น จะมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนไป เวกเตอร์ที่แสดงทิศทางและระยะกระจัดระหว่างสปิลเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานสามารถวัดได้จากบอล-บาร์

เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวแกนเลื่อนทั้ง 3 แกนนั้น มีเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงวัดได้โดยตรง (Direct Calibration) คือ เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Raksiri, C. and M. Parnichkun, 2004) แต่ความผิดพลาดของการหมุนของโต๊ะวางชิ้นงานที่หมุนได้นั้นมีเครื่องมือที่ซับซ้อนและราคาที่สูง (Iwasawa, K. *et,al.*, 2004) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้บอล-บาร์วัดระยะทางที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งของ สปิลเดิลทูล และโต๊ะวางชิ้นงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังนั้นเมื่อสามารถปรับเทียบการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y และZ โดยการชดเชยค่าความผิดพลาดที่วัดได้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แล้ว ระยะทางที่ผิดพลาดไปนั้นจะเกิดขึ้นจากการหมุนของโต๊ะวางชิ้นงานที่ผิดพลาดเท่านั้น



ภาพที่ 6 ความผิดพลาดทางตำแหน่ง (Positioning Error)

5. สมการการแปลงเอกพันธุ์ (Homogeneous Transformation Model)

การวิเคราะห์ตำแหน่งทางศาสตร์หุ่นยนต์ (Robotic) พิกัดตำแหน่ง (Coordinate Position) ของปลายแขนนั้น สามารถคำนวนได้จากสมการการแปลงเอกพันธุ์ เมื่อแทนค่าตัวแปรของข้อต่อ (Joint) และลิงค์ลงในสมการเพื่อจะหาค่าตำแหน่งและทิศทางได้ หลักการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรซีเอ็นซีเพื่อคำนวณตำแหน่งสัมพันธ์ของสปินเดิลทูลและชิ้นงาน (Relative Positional) การเปลี่ยนแปลงของข้อต่อ (Joint) แทนการเปลงของโต๊ะวางชิ้นงานที่หมุนได้ (Rotation) และสปิลเดิลทูลที่เลื่อนได้ (Translational) นั่นคือ เมื่อเครื่องจักรซีเอ็นซีได้รับคำสั่งให้แกนเลื่อนและแกนหมุนเกิดการเคลื่อนที่ และทำให้ตำแหน่งของเครื่องมือและชิ้นงานมีการเปลี่ยนไป ตำแหน่งของเครื่องมือและชิ้นงานนี้ สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โฮโมจีเนียสทรานสฟอร์เมชั่นเมทริกซ์ (Homogeneous Transformation Matrix)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การแปลง (Transformation) เป็นการอธิบายการการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ที่เทียบกับกรอบอ้างอิง (Frame) มีการระบุค่าในเชิงพิกัดเทียบกับกรอบอ้างอิง (Frame) ในสามมิติสามารถเขียนได้ในรูปเมทริกซ์การแปลงเอกพันธุ์ (Homogeneous Transformation) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมี 2 การเปลี่ยนแปลงคือ การเลื่อน (Translation) และการหมุน (Rotation) ซึ่งทั้งสองการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถอธิบายในรูปเมทริกซ์การแปลงเอกพันธุ์ได้ดังนี้

5.1. Translation

จุดใดๆ ในปริภูมิ (Space) สามารถแสดงตำแหน่งได้ ก็ต่อเมื่อมีกรอบอ้างอิงและตำแหน่งนั้นอธิบายจากระยะทางของจุดห่างจากกรอบอ้างอิงตามแนวแกน X Y และ Z ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์คือ

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

P_x คือระยะห่างเทียบกับแกน x ของกรอบที่อ้างอิง
P_y คือระยะห่างเทียบกับแกน y ของกรอบที่อ้างอิง
P_z คือระยะห่างเทียบกับแกน z ของกรอบที่อ้างอิง

5.2. Rotation

จุดใดๆในปริภูมินอกจากจะแสดงตำแหน่งเป็นระยะทางเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงแล้ว สามารถแสดงตำแหน่ง เมื่อเกิดการหมุน (Rotation) รอบแกนของกรอบอ้างอิง ได้แก่ แกน X แกน Y และแกน Z สามารถคำนวนตำแหน่งที่ห่างจากกรอบอ้างอิงได้จากฟังก์ชันตรีโกณมิติ และเขียนในรูปเมทริกซ์ตามลำดับคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$Rot(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Rot(z,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

θ คือขนาดของมุมที่หมุนรอบแกน X Y และ Z

6. เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix)

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อซึ่งมีผลต่อตำแหน่งของสปินเดิลทูลที่สัมพันธ์กับชิ้นงานสามารถคำนวณได้จาก Homogeneous Transformation Model ดังที่กล่าวมาซึ่ง Homogeneous Transformation Model นั้นคือสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันหลายตัวแปร สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4 \ldots x_j) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4 \ldots x_j) \\ &\vdots \\ y_i &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4 \ldots x_j) \end{aligned} \quad (5)$$

i = จำนวนฟังก์ชั่น

j = จำนวนตัวแปรในฟังก์ชัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จาโคเบียนคืออนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Order Differential) ของฟังก์ชันหลายตัวแปร แสดงตามสมการที่ (6) และสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้แสดงดังสมการที่ (7)

$$\begin{aligned}
\delta y_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\delta x_1 + \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\delta x_2 + \quad .... \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_j}\delta x_j \\
\delta y_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\delta x_1 + \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\delta x_2 + \quad .... \quad \frac{\partial f_2}{\partial x_j}\delta x_j \\
&\vdots \\
\delta y_i &= \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\delta x_1 + \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_2}\delta x_2 + \qquad\quad \frac{\partial f_i}{\partial x_j}\delta x_j
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_1 \\ \vdots \\ \delta y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & & \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} & & & \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_j \end{bmatrix} \tag{7}$$

จากสมการที่ (7) ตัวแปรในฟังก์ชันของ Homogeneous Transformation Model คือ Joint Variable ดังนั้น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยใน Joint Variable ก็จะส่งผลต่อฟังก์ชั่นซึ่งคือค่าซ้ายมือของสมการ (Left Hand Side) ซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่เกิดขึ้นที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงาน dx_w, dy_w และ dz_w ส่วน di ,dj และ dk คือทิศทางเวกเตอร์ของ สปิลเดิลทูลที่เทียบกับชิ้นงาน ซึ่งสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์แสดงในสมการที่ (8)

$$\begin{bmatrix} dx_w \\ dy_w \\ dz_w \\ di \\ dj \\ dk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ Jacobian \\ \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_m \\ dy_m \\ dz_m \\ dA \\ dC \end{bmatrix} \tag{8}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การชดเชยความผิดพลาด (Error Compensation)

การชดเชยความผิดพลาดในเครื่องจักรซีเอ็นซีทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

7.1. การชดเชยความผิดพลาดใน ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

การชดเชยความผิดพลาดในฮาร์ดแวร์คือการปรับปรุงฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ เช่น การปรับระยะแกน การเปลี่ยนสายพาน การเปลี่ยนชุดเฟืองขับเป็นต้น (Ekinci, O. *et,al.,*2009)

7.2. การชดเชยความผิดพลาดในซอร์ฟแวร์ (Software)

(Rahman, M. *et,al.*, 2000) อธิบายการชดเชยค่าความผิดพลาดทางซอร์ฟแวร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดหลายแกนไว้ 2 แบบคือ

7.2.1 Implementation in Postprocessor (PP) คือ การชดเชยค่าความผิดพลาดใน Postprocessor

7.2.2 Implementation in Extra NC-program (ENPP) คือ การชดเชยค่าความผิดพลาดที่ได้มาจากการวัดโดยตรงหรือการวิเคราะห์จากสมการทางคณิตศาสตร์ โดยชดเชยค่าความผิดพลาดโดยตรงในคำสั่ง NC-program ของเครื่องจักร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Koshiro and Iwasawa (2004) พัฒนาการวัดค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรเอ็นซี (NC Machine) ด้วยการใช้ Laser Displacement Interferometer และโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder)

Srivastava *et al.*(1995) สร้างสมการ Volumetric Error จากพื้นฐานของ DH-transformation ที่สามารถชดเชยค่าความผิดพลาดได้ จากการศึกษาพบว่า ความผิดพลาดจากการหมุนและการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงมีผลกระทบต่อตำแหน่งของเครื่องมือ (Tool Position)

Bohez *et al.*(1997) พัฒนาวิธีขั้นตอน (Algorithm) ของโปรแกรมของเครื่องจักรชนิดห้าแกน เพื่อการขึ้นรูปของชิ้นงานที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตซับซ้อน

Peng *et al.*(2010) ศึกษาการวัดค่าความผิดพลาดทางโครงสร้าง (Geometric Error) ของโต๊ะหมุนของเครื่องจักรห้าแกน โดยประยุกต์ใช้ดับเบิลบอล-บาร์ (Double Ball Bar) วัดระยะระหว่างโต๊ะวางชิ้นงาน (Workpiece Table) และ สปินเดิลทูล (SpindleTool) และคำนวณองค์ประกอบความผิดพลาดได้ทั้งหมด 4 องค์ประกอบ

Tsutsumi and Saito (2003) ศึกษาความแปรปรวนเชิงระบบ (Systematic deviation particular) ของเครื่องจักรห้าแกน โดยใช้ Telescopic Ball Bar วัดระยะระหว่างชิ้นงานและสปินเดิลทูลและคำนวณองค์ประกอบของความแปรปรวนเชิงระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสามารถชดเชยค่าความแปรปรวนดังกล่าวให้เครื่องจักรมีความแม่นยำมากขึ้น

Tsutsumi and Saito (2004) ศึกษาองค์ประกอบความผิดพลาดเชิงระบบของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน ได้แก่องค์ประกอบความความผิดพลาดเชิงมุม 9 องค์ประกอบและความผิดพลาดเชิงการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงของแกน 4 องค์ประกอบ โดยวิธีการเคลื่อนที่พร้อมกัน 4 แกน (Four axis Simultaneous Control Movement) โดยใช้บอล-บาร์วัดระยะระหว่างโต๊ะวางชิ้นงานและสปินเดิลทูล ซึ่งองค์ประกอบความผิพลาดดังกล่าวจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่พร้อมกัน 4 แกน ซึ่งทำให้คำนวณองค์ประกอบความผิดพลาดออกมาได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Mahbubur *et al.,* (1997) พัฒนาวิธีการเพิ่มความแม่นยำของเครื่องจักรชนิดห้าแกน โดยประมาณค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จากการวัดด้วย DBB และชดเชยค่าความผิดพลาดนี้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความผิดพลาดทางตำแหน่งของเครื่องจักรชนิดห้าแกน

Suh *et al.*, (1998) ใช้ Auto Collimatorวัดความผิดพลาดทางโครงสร้างของโต๊ะวางชิ้นงาน และชดเชยค่าความผิดพลาดในชุดควบคุมของเครื่องจักร (CNC Controller) จากผลการทดลอง พบว่าาสามารถทำให้เครื่องจักรมีความแม่นยำมากขึ้น

Zargarbashi and Mayer (2006) ออกแบบการทดลอง เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ของโต๊ะหมุนแกน A เพื่อ โดยใช้บอลบาร์ ติดตั้งเพียงครั้งเดียว เพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลจากแกนอื่น และลดเวลาในการทดลอง

Lee and She (2000) พัฒนาโพสโพรเซสเซอร์ (Post Processor) จากสมการการแปลงอนุพันธ์ของเครื่องจักรห้าแกน ทั้ง 3 ชนิด จากผลการทดลองพบว่า วิธีนี้สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Hsu and Wang (2007) เสนอวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักรชนิด ห้าแกนโดยศึกษาจากสมการจลนพลศาสตร์ (Kinematic Equations) พบว่าการหมุน (Rotation) ของเครื่องจักรเป็นอิสระต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ดังนั้นต้องชดเชยความผิดพลาดต้องชดเชยจากการหมุนก่อน แล้วจึงชดเชยความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Translation) เรียกว่า วิธีดีคับเปิล (Decouple Method) ซึ่งเมื่อชดเชยใน Post Processor พบว่าสามารถเพิ่มความแม่นยำในเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Lamikiz *et al.*, (2008) พัฒนาสมการสำหรับประเมินความแม่นยำของเครื่องจักร (Accuracy) ของเครื่องห้าแกน โดยใช้สมการ DH Equation พบว่า ความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักร มีผลน้อยมากต่อความผิดพลาดทางตำแหน่งของเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนชนิด RRLLL คือเครื่องจักรซีเอ็นซีที่ประกอบด้วยการเรียงลำดับของแกนโต๊ะที่สามารถหมุนได้ 2 แกน และแกนเลื่อน 3 แกนตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sartori and Zhang (1995) สร้างสร้างเวกเทอร์เรียล (Vectorial Equation) สำหรับการคำนวณความผิดพลาดเชิงปริมาตร (Volumetric Error) ซึ่งสามารถชดเชยค่าความผิดพลาดโดยใช้เทคนิคซีเอ็มเอ็ม (CMM Technique: Coordinate Measuring Machine)

Raksiri and Parnichkun (2004) ศึกษาการชดเชยค่าความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักรสามแกนโดยใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์วัดความผิดพลาดทางตำแหน่ง และคำนวณองค์ประกอบของค่าความผิดพลาดทางโครงสร้างโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Model)

Bohez et al. (2002) ศึกษาความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักรชนิดห้าแกนประกอบด้วย 39 องค์ประกอบที่เป็นอิสระต่อกัน และเสนอวิธีการชดเชยค่าความผิดพลาดเหล่านี้โดยชดเชยค่าความผิดพลาดจากการหมุน (Rotational Error) แยกกับ ความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Translational Error)

Uddin et al. (2009) ประเมินค่าความผิดพลาดทางโครงสร้างของเครื่องจักรห้าแกนโดยใช้ DBB วัดความผิดพลาดทางตำแหน่งของชิ้นงานซึ่งคำนวณได้จากความผิดพลาดทางจลนศาสตร์ (Kinematic Error) จากการศึกษาสามารถตรวจสอบความถูกต้องจากการชดเชยค่าความผิดพลาดของเครื่องจักรซึ่งทำให้เครื่องจักรมีความแม่นยำขึ้น

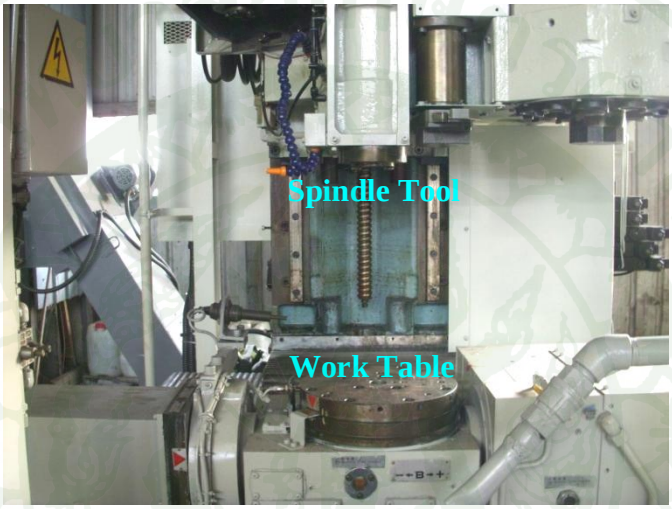
Lei และ Hsu (2002) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความผิดพลาดของเครื่องจักรห้าแกนเพื่อคำนวณความผิดพลาดทางตำแหน่ง ที่ได้จากการวัดโดย DBB และสามารถคำนวณองค์ประกอบความผิดพลาดได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน



ภาพที่ 7 เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนที่ใช้ในการทดลอง

2. Ball-Bar Renishaw QC10

ภาพที่ 8 ชุดอุปกรณ์บอล-บาร์ Renishaw Ball Bar QC10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ชุดอุปกรณ์เลเซอร์ของ Renishaw รุ่น ML10 ซึ่งประกอบไปด้วย

3.1. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (ML 10 Measurement Laser Generate)

3.2. อุปกรณ์ชดเชยความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอันเกิดจากปัจจัยอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ (EC10 Environmental Compensation Unit)

3.3. กระจกสำหรับการสะท้อนและการแทรกสอดของเลเซอร์ (Linear Measurement Mirror Kit)

4. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูลของชุดอุปกรณ์เลเซอร์
5. โปรแกรม MATLAB
6. โปรแกรม Unigraphic 6.0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

การทดลองเพื่อประยุกต์ใช้บอล-บาร์วัดค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกนของเครื่องจักรชนิดห้าแกนนั้น มีหลักการคือเมื่อเครื่องจักรชนิดห้าแกนที่ประกอบด้วยการเลื่อนตามแนวเส้นตรงและการหมุนรอบแกน เคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน (Synchronizing) จะเกิดระยะทางที่ปกติ (Nominal) ระหว่างสปินเดิลทูลที่ติดไว้ที่แกนเลื่อนและโต๊ะวางชิ้นงานที่สามารถหมุนได้ ระยะทางจะมีค่าแตกต่างจากปกติ เกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรเกิดความความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ ถ้าทำการปรับเทียบให้แกนเลื่อนของเครื่องจักรเคลื่อนที่ถูกต้อง ระยะทางที่ผิดพลาดสามารถวัดได้จากการประยุกต์ใช้บอล-บาร์ ซึ่งความผิดพลาดจะเกิดจากการหมุนที่ผิดพลาดรอบแกนเท่านั้น ดังนั้นวิธีการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. วัดค่าความผิดพลาดของการเลื่อนทั้ง 3 แกนด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และปรับให้ถูกต้อง
2. วัดค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกนโดยประยุกต์ใช้บอล-บาร์

1. การวัดค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

งานวิจัยนี้นำเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มาวัดค่าความผิดพลาดในการเลื่อนตามแนวเส้นตรงของเครื่องจักรทั้งสามแกนได้แก่ แกน X Y และZ และทำการชดเชยค่าความผิดพลาดใน NC-program ให้การเลื่อนตามแนวเส้นตรง (Translational) ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนถูกต้อง ซึ่งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ใช้วัดคือ Renishaw ML10 ของฝ่ายเครื่องมือวัด สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งในการวัดหาความผิดพลาดทางการเลื่อนตามแนวเส้นตรงนั้น จะติดตั้งกระจกสำหรับแทรกสอดที่สปินเดิล ส่วนกระจกสำหรับสะท้อนจะติดที่โต๊ะวางชิ้นงานดังภาพที่ (9-11)

หลังจากนั้นจะทำการปรับตั้งให้ชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ กระจกสำหรับแทรกสอดและกระจกสำหรับสะท้อนอยู่ในแนวเดียวกัน จากนั้นสั่งให้สปินเดิลทูลเคลื่อนที่ตามแนวแกนเลื่อน (x y และ z) ที่ต้องการวัด ซึ่งระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่นั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มีการกีดขวางทางเดินของเครื่องจักรดังนั้นระยะการเคลื่อนที่มีดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

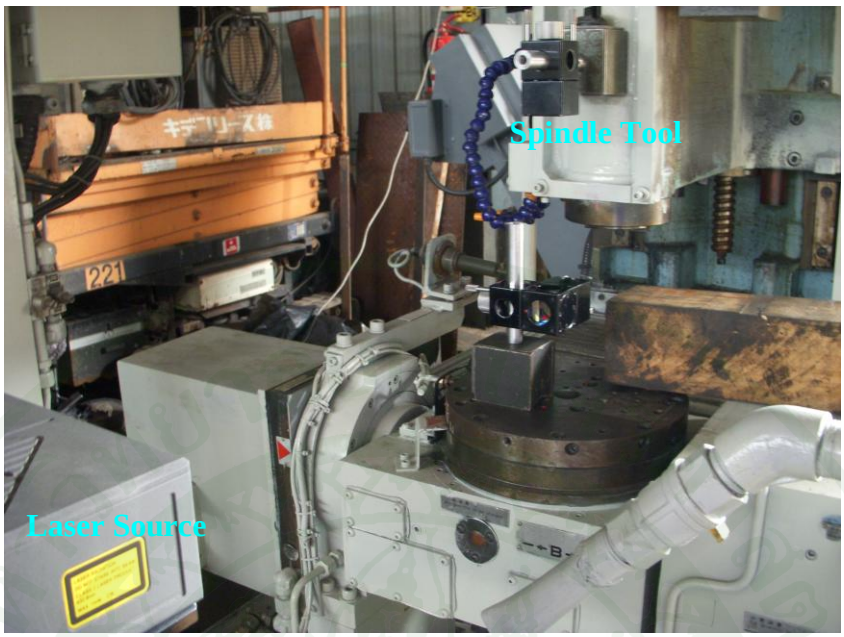
ระยะในการวัดความผิดพลาดด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน X คือ 0 ถึง 200 มิลลิเมตร ตามความสามารถในการเลื่อนในแนวแกน X โดยมีช่วงระยะการหยุดบันทึกค่าคือ 10 มิลลิเมตร

ระยะในการวัดค่าความผิดพลาดทางด้านตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y คือ 0 ถึง 130 มิลลิเมตร ตามความสามารถในการเลื่อนในแนวแกน Y โดยมีช่วงระยะการหยุดบันทึกค่าคือ 10 มิลลิเมตร

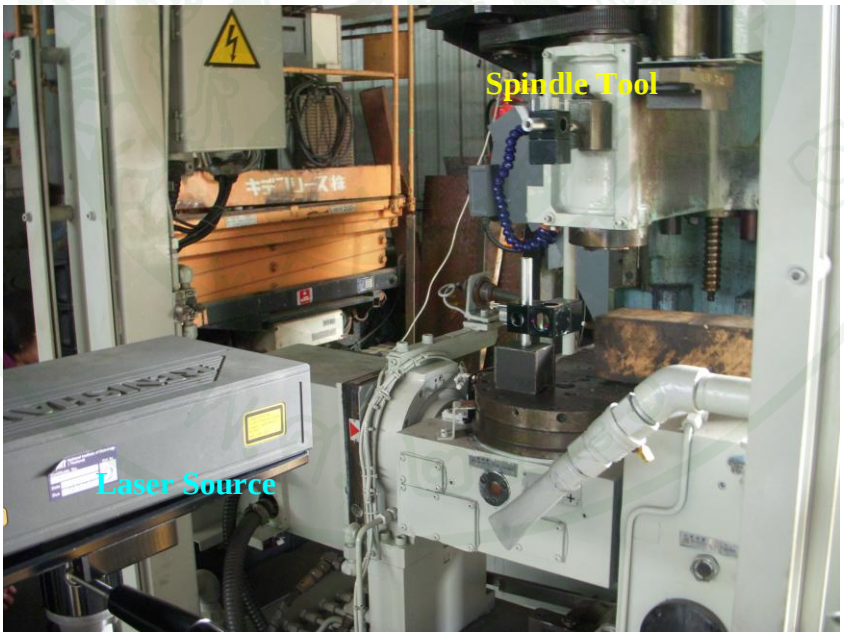
ระยะในการวัดค่าความผิดพลาดด้านตำแหน่งในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z คือ 80 ถึง 300 มิลลิเมตร ตามความสามารถในการเลื่อนในแนวแกน Z โดยมีช่วงระยะการหยุดบันทึกค่าคือ 10 มิลลิเมตร

ภาพที่ 9 การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y



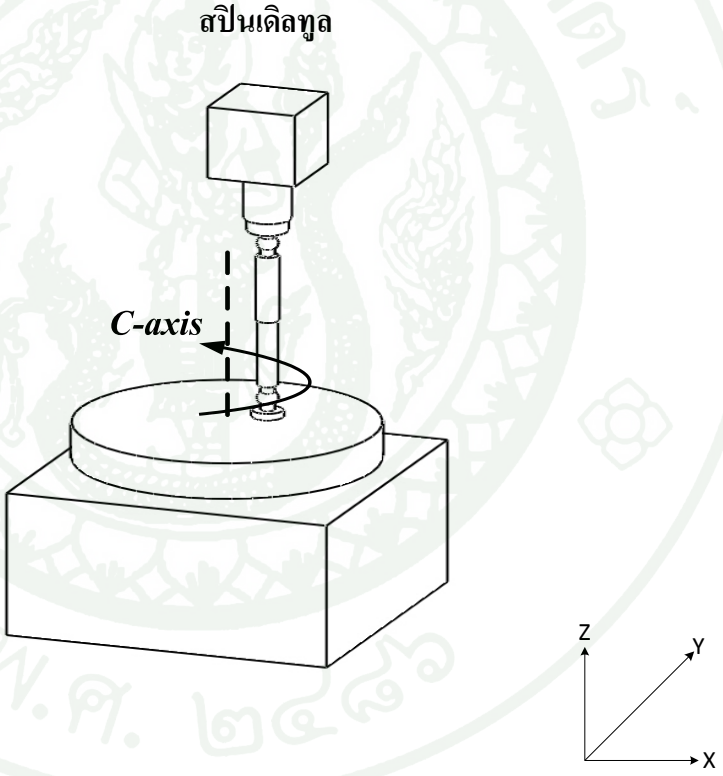
ภาพที่ 11 การติดตั้งเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การวัดความผิดพลาดของการหมุนในแนวแกน C

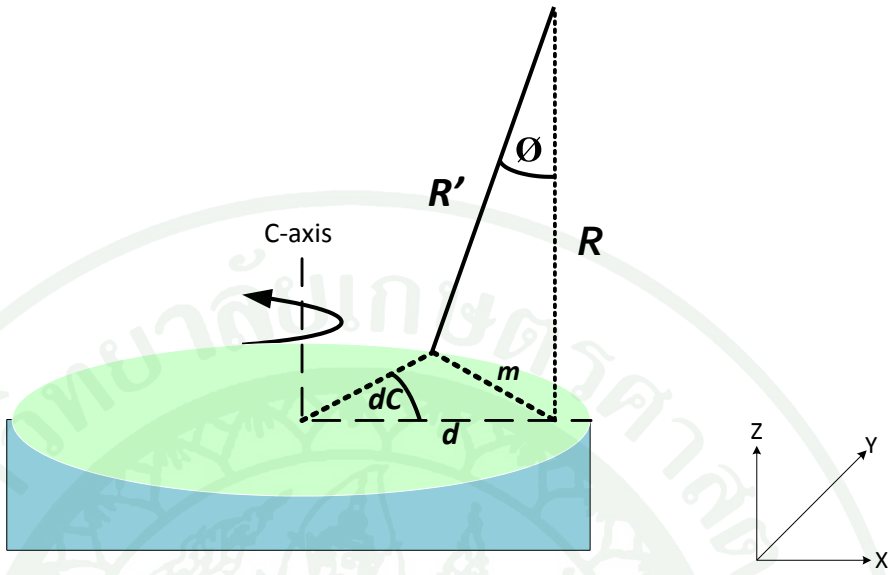
2.1. การติดตั้งบอล-บาร์กับเครื่องจักรซีเอ็นซี

ติดตั้งบอล-บาร์ตามแนวตั้งขนาดกับแกน Z ของเครื่องจักรซีเอ็น และให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะด้วยระยะ d เนื่องจากเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนนี้ มีระยะการเลื่อนตามแนวเส้นตรงที่จำกัด ติดตั้ง Tool cup ให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะและติดตั้ง Pivot Assembly เข้ากับสปินเดิลทูล ของเครื่องจักร สร้างคำสั่งจีโค้ดให้สปินเดิลทูลและแกนC เดินเป็นวงกลมตามระนาบ XY พร้อมกันกัน (Synchronizing) ตามภาพที่12



ภาพที่ 12 การติดตั้งบอล-บาร์กับเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนเพื่อการวัดค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C เมื่อมองจากด้านหน้า (Front View)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 ภาพแบบจำลองทางเรขาคณิตวิเคราะห์ เพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน C

2.2. การคำนวณค่าความผิดพลาดเนื่องจากการหมุนรอบแกน C

ภาพที่ 13 อธิบายภาพจำลองทางเรขาคณิตเพื่อคำนวณมุมที่เกิดจากการหมุนรอบแกน C ที่ผิดพลาด

R คือความยาวของบอล-บาร์ในอุดมคติ (Ideal)

R′ คือความยาวของบอล-บาร์ที่วัดได้จากเครื่องจักรที่เกิดความผิดพลาด

m คือระยะทางที่เกิดจากการหมุนที่ผิดพลาดรอบแกน C ของโต๊ะวางชิ้นงาน

d คือระยะการติดตั้งของ Tool cup ของบอล-บาร์ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะหมุนตามแนวแกน X

เมื่อเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่โดยสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานหมุนพร้อมๆกันแล้วเป็นวงกลมในระนาบ XY จะทำให้เกิดระยะคงที่ ซึ่งได้ทำการชดเชยค่าความผิดพลาดของการเลื่อนในแนวเส้นตรงของสปินเดิลทูลแล้ว ซึ่งถ้าโต๊ะหมุนมีการหมุนรอบแกน C ที่ผิดพลาดจะทำให้เกิดระยะทางที่ยาวขึ้นเนื่องจากเครื่องโต๊ะหมุนนั้นจะดึงบอล-บาร์ให้มีการยืดออก ส่วนระยะในอุดมคติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นั้นก็จะตั้งฉากกับโต๊ะวางชิ้นงานและสปินเดิลทูล จากความสัมพันธ์นี้สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากการหมุนของแกน C โดยสมการที่ (9-11)

$$\varnothing = \cos^{-1}\left[\frac{R}{R'}\right] \tag{9}$$

มุม Ø คือมุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของบอล-บาร์และความยาวของบอล-บาร์จากอุดมคติ

$$m = R'\sin\varnothing \tag{10}$$

m คือระยะทางระหว่างตำแหน่งของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากความผิดพลาดเทียบกับสปิลเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานเทียบกับ สปิลเดิลทูลในอุดมคติ

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหามุมที่เกิดจากการหมุนที่ผิดพลาดรอบแกนC (ในหน่วย Radian)ได้โดย

$$dC = 2\sin^{-1}\left[\frac{m}{2d}\right] \tag{11}$$

ดังนั้น เมื่อสั่งให้เครื่องจักรซีเอ็นซีหมุนไปในมุมต่างๆ จะสามารถเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของบอล-บาร์เทียบกับอุดมคติและคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ข้างต้น

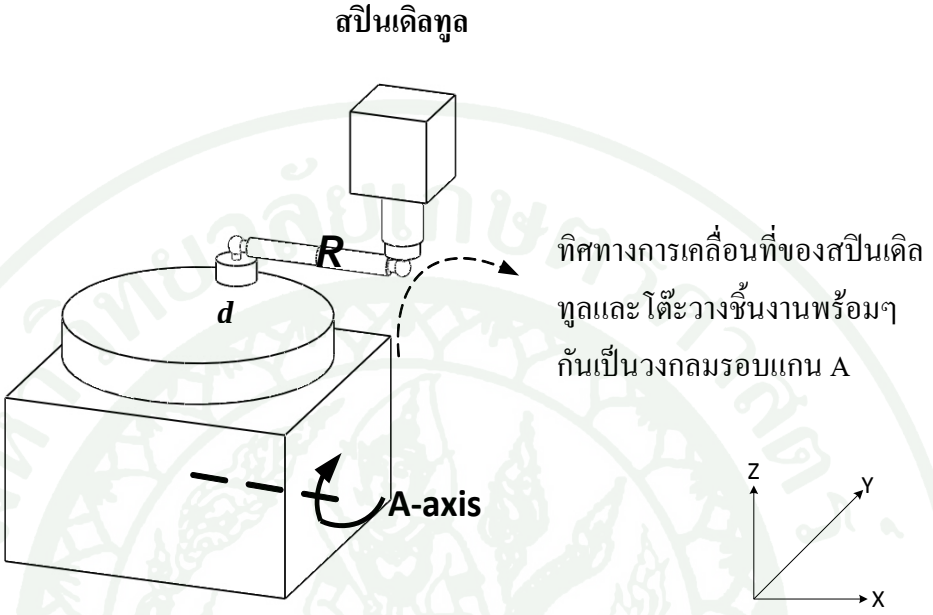
3. การวัดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการหมุนรอบแกน A

3.1. การติดตั้งบอล-บาร์ กับเครื่องจักรซีเอ็นซี

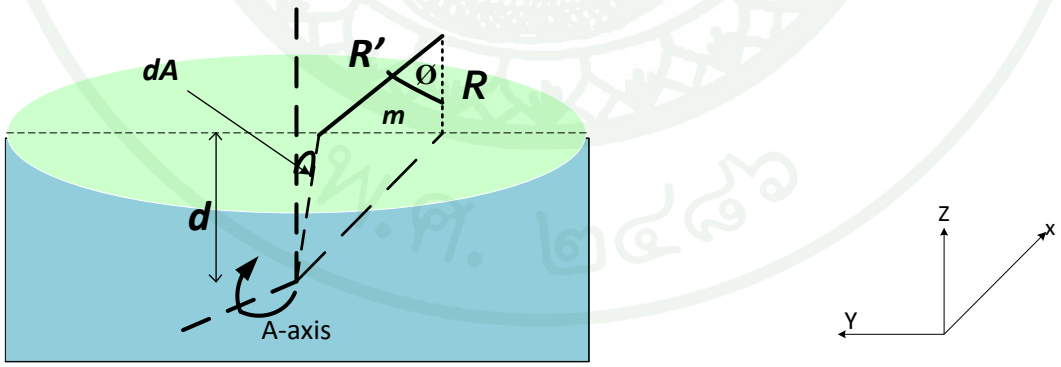
ติดตั้งบอล-บาร์ตามแนวตั้งขนาดกับแกน Y ของเครื่องจักรซีเอ็น และให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะขนานกับแกน X เป็นระยะ ***d*** ดังภาพที่ 14 เนื่องจากเครื่องจักรซีเอ็นซีห้าแกนนี้มีระยะการเลื่อนตามแนวเส้นตรงที่จำกัด ระยะ 8 มิลลิเมตรนี้เป็นระยะที่ไกลที่สุดที่สามารถกำหนดให้แกนเลื่อนตามแนวแกน Y เดินเป็นวงกลมตามรัศมีที่ใหญ่ที่สุดได้ ติดตั้ง Tool cup ให้ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะ และติดตั้ง Pivot Assembly เข้ากับสปินเดิลทูล ของเครื่องจักร แท่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บาร์ของบอล-บาร์นั้นจะวางอยู่ตามระนาบแกน Y สร้างคำสั่งจีโค้ดให้เครื่องเดินเป็นวงกลมตามระนาบ YZ พร้อมๆกัน ตามภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การติดตั้งบอล-บาร์กับเครื่องจักรเพื่อวัดค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกนA เมื่อมองจากด้านหน้า (Front view)



ภาพที่ 15 ภาพแบบจำลองทางเรขาคณิตวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน A มองจากด้านข้าง (Side View)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4. การคำนวณค่าความผิดพลาดเนื่องจากการหมุนรอบแกน A

จากภาพที่15 ซึ่งเป็นภาพจำลองทางเรขาคณิต จะพบว่าจุดศูนย์กลางของการหมุนรอบแกน A เป็นระยะ ***d*** จึงตั้งบอล-บาร์ให้หมุนรอบแกน A เป็นวงกลมโดยติดตั้งให้บอล-บาร์วางตัวขนานกับแกน A ซึ่ง

R คือความยาวของบอล-บาร์ในอุดมคติ (Ideal)

$\boldsymbol{R'}$ คือความยาวของบอล-บาร์ที่วัดได้จากเครื่องจักรที่เกิดความผิดพลาด

m คือระยะทางที่เกิดจากการหมุนที่ผิดพลาดรอบแกน A ของโต๊ะวางชิ้นงาน

d คือระยะการติดตั้งของ Tool cup ของบอล-บาร์ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของโต๊ะหมุน

เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่ โดยสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานหมุนพร้อมๆ กันในระนาบ YZ แล้ว จะทำให้เกิดระยะคงที่ ซึ่งได้ทำการชดเชยค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนในแนวเส้นตรงของสปินเดิลทูลแล้ว ซึ่งถ้าโต๊ะหมุนมีการหมุนรอบแกน C ที่ผิดพลาด จะทำให้เกิดระยะทางที่ยาวขึ้นเนื่องจาก โต๊ะหมุนนั้นจะบิดรั้งบอล-บาร์ให้ยืดออกเป็นระยะ $\boldsymbol{R'}$ ส่วนระยะในอุดมคติ ***R*** นั้นจะตั้งฉากกับโต๊ะวางชิ้นงานและสปินเดิลทูล ความสัมพันธ์ในฟังก์ชันโคไซน์ของระยะทั้งสองที่กล่าวมา ทำให้สามารถคำนวณมุม Ø ซึ่งเป็นระยะระหว่างความยาวของบอล-บาร์ปกติและบอล-บาร์ที่ยืดออกเนื่องจากการหมุนรอบแกนที่ผิดพลาดได้ เมื่อทราบมุม Ø ทำให้ทราบระยะทางที่ฉายบนโต๊ะหมุนคือ ระยะ *m* ซึ่งเป็นระยะที่เกิดจากการหมุนที่ผิดพลาด ซึ่งทำให้สามารถคำนวณมุมที่หมุนผิดพลาดรอบแกน A ได้ โดยสมการที่ (12-15) สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากการหมุนของแกน A โดยสมการที่

$$\varnothing = \cos^{-1}\left[\frac{R}{R'}\right] \tag{12}$$

มุม Ø คือมุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของบอล-บาร์และความยาวของบอล-บาร์จากอุดมคติ

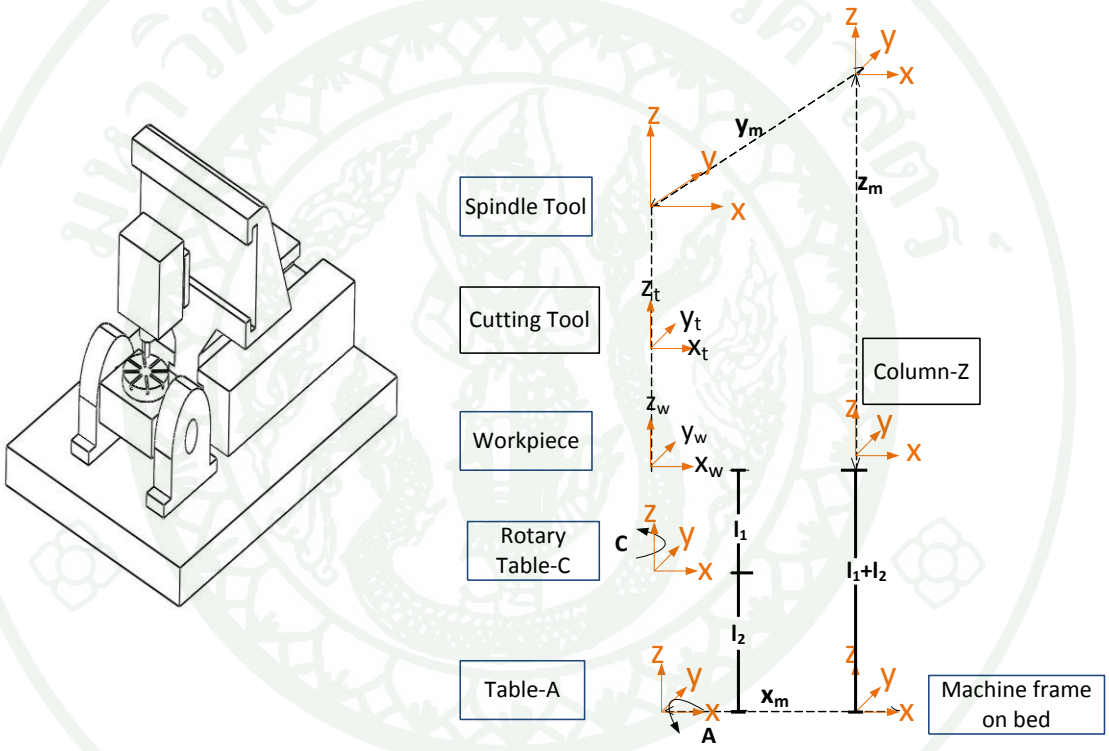
$$m = R'\sin\varnothing \tag{13}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

m คือระยะทางระหว่างตำแหน่งของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากความผิดพลาดเทียบกับสปิลเดิลทูล และโต๊ะวางชิ้นงานเทียบกับสปิลเดิลทูลในอุดมคติ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหามุมที่เกิดจากการหมุนรอบแกนที่ผิดพลาดของแกนA ได้โดย

$$dA = 90 - 2\sin^{-1}\left[\frac{m}{2d}\right] \qquad (15)$$

4. สมการการแปลงเอกพันธุ์ของเครื่องจักรห้าแกน (Homogeneous Transformation)



ภาพที่ 16 โครงสร้างของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนชนิด 2-0 machine

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนชนิด 2-0 machine ประกอบด้วยโต๊ะวางชิ้นงานที่สามารถหมุนได้ 2 แกน และเครื่องมือที่เลื่อนได้ 3 แกนดังภาพที่ (16) เมื่อตั้งแกนและสร้างสมการการแปลงเอกพันธุ์ซึ่งมีตัวแปรของแกนการเคลื่อนที่ต่างๆซึ่งหาผลเฉลยมาแล้ว สามารถแสดงได้ดังสมการที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$T56 \cdot T45 \cdot T34 \cdot T23 \cdot T12 \cdot T01 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x_w \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y_w \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

โดยที่

$$T01 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$T12 = \begin{bmatrix} \cos(C) & -\sin(C) & 0 & 0 \\ \sin(C) & \cos(C) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$T23 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$T34 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A) & -\sin(A) & 0 \\ 0 & \sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$T45 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_1 + l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$T56 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_m \\ 0 & 1 & 0 & y_m \\ 0 & 0 & 1 & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

เมื่อคำนวณได้ผลเฉลยดังสมการที่ 16

$$dx_m = p_x = -x_m \cos(C) - (l_1 + l_2)\sin(A)\sin(C) - y_m \cos(A)\sin(C) - z_m \sin(A)\sin(C) \quad (23)$$

$$dy_m = p_y = x_m \sin(C) - (l_1 + l_2)\cos(C)\sin(A) - y_m \cos(A)\cos(C) - z_m \cos(C)\sin(A) \quad (24)$$

$$dz_m = p_z = y_m \sin(A) - z_m \cos(A) - (l_1 + l_2)\cos(A) + (l_1 + l_2) \quad (25)$$

$$i = r_{13} = \sin(A)\sin(C) \quad (26)$$

$$j = r_{23} = -\cos(C)\sin(A) \quad (27)$$

$$k = r_{33} = \cos A \quad (28)$$

5. สมการความผิดพลาดของเครื่องจักรห้าแกน

จากสมการที่ (16) ได้ผลเฉลยค่าความผิดพลาดดังนี้

$$\begin{bmatrix} dx_w \\ dy_w \\ dz_w \\ di \\ dj \\ dk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_m \\ dy_m \\ dz_m \\ dA \\ dC \end{bmatrix} \quad (29)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$
\begin{aligned}
J_{11} &= -\cos(C) \\
J_{12} &= -\cos(A)\sin(C) \\
J_{13} &= -\sin(A)\sin(C) \\
J_{14} &= y_m \sin(A)\sin(C) - z_m \cos(A)\sin(C) \\
&\quad - (l_1 + l_2)\cos(A)\sin(C) \\
J_{15} &= x_m \sin(C) - (l_1 + l_2)\cos(C)\sin(A) - y_m \cos(A)\cos(C) \\
&\quad - z_m \cos(C)\sin(A) \\
J_{21} &= \sin(C) \\
J_{22} &= -\cos(A)\cos(C) \\
J_{23} &= -\cos(C)\sin(A) \\
J_{24} &= y_m \cos(C)\sin(A) - z_m \cos(A)\cos(C) \\
&\quad - (l_1 + l_2)\cos(A)\cos(C) \\
J_{25} &= x_m \cos(C) + (l_1 + l_2)\sin(A)\sin(C) + y_m \cos(A)\sin(C) \\
&\quad + z_m \sin(A)\sin(C) \\
J_{31} &= 0 \\
J_{32} &= \sin(A) \\
J_{33} &= -\cos(A) \\
J_{34} &= (l_1 + l_2)\sin(A) + y_m \cos(A) + z_m \sin(A) \\
J_{35} &= 0 \\
J_{41} &= 0 \\
J_{42} &= 0 \\
J_{43} &= 0 \\
J_{44} &= y_m \sin(A)\sin(C) - z_m \cos(A)\sin(C) \\
&\quad - (l_1 + l_2)\cos(A)\sin(C) \\
J_{45} &= x_m \sin(C) - (l_1 + l_2)\cos(C)\sin(A) - y_m \cos(A)\cos(C) \\
&\quad - z_m \cos(C)\sin(A) \\
J_{51} &= 0 \\
J_{52} &= 0 \\
J_{53} &= 0 \\
J_{54} &= \cos(A)\cos(C) \\
J_{55} &= -\sin(A)\sin(C) \\
J_{61} &= 0 \\
J_{62} &= 0 \\
J_{63} &= 0 \\
J_{64} &= \cos(A)\cos(C) \\
J_{65} &= -\sin(A)\sin(C)
\end{aligned}
\tag{30}
$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$
\begin{aligned}
dx_w &= -dx_m \cos(C) \\
&\quad - dC[l_1 \cos(C)\sin(A) - x_m \sin(C) + y_m \cos(A)\cos(C) + z_m \cos(C)\sin(A)] \\
&\quad -dy_m \cos(A)\sin(C) - dz_m \sin(A)\sin(C) \\
&\quad -\frac{1}{2} dA \sin(C)[l_1 \cos(A) + z_m \cos(A) - y_m \sin(A)] \\
dy_w &= dx_m \sin(C) - dA[l_1 \cos(A)\cos(C) + z_m \cos(A)\cos(C) \\
&\quad -y_m \cos(C)\sin(A) + dc[x_m \cos(C) \\
&\quad +l_1 \sin(A)\sin(C) + y_m \cos(A)\sin(C) + z_m \sin(A)\sin(C) \\
dz_w &= dA(l_1 \sin(A) + y_m \cos(A) + z_m \sin(A) - dz_m \cos(A) + dy_m \sin(A)
\end{aligned}
\tag{31}
$$

$$
\begin{aligned}
di &= -dC(l_1 + l_2)\cos(C)\sin(A) - x_m \sin d(C) + y_m \cos(A)\cos(C) \\
&\quad + z_m \cos(C)\sin(A) - dA\sin(C)(l_1 + l_2)\cos(A) + z_m \cos(A) - y_m \sin(A) \\
dj &= dA\cos(A)\cos(C) - dC\sin(A)\sin(C) \\
dk &= dA\cos(A)\cos(C) - dC\sin(A)\sin(C)
\end{aligned}
$$

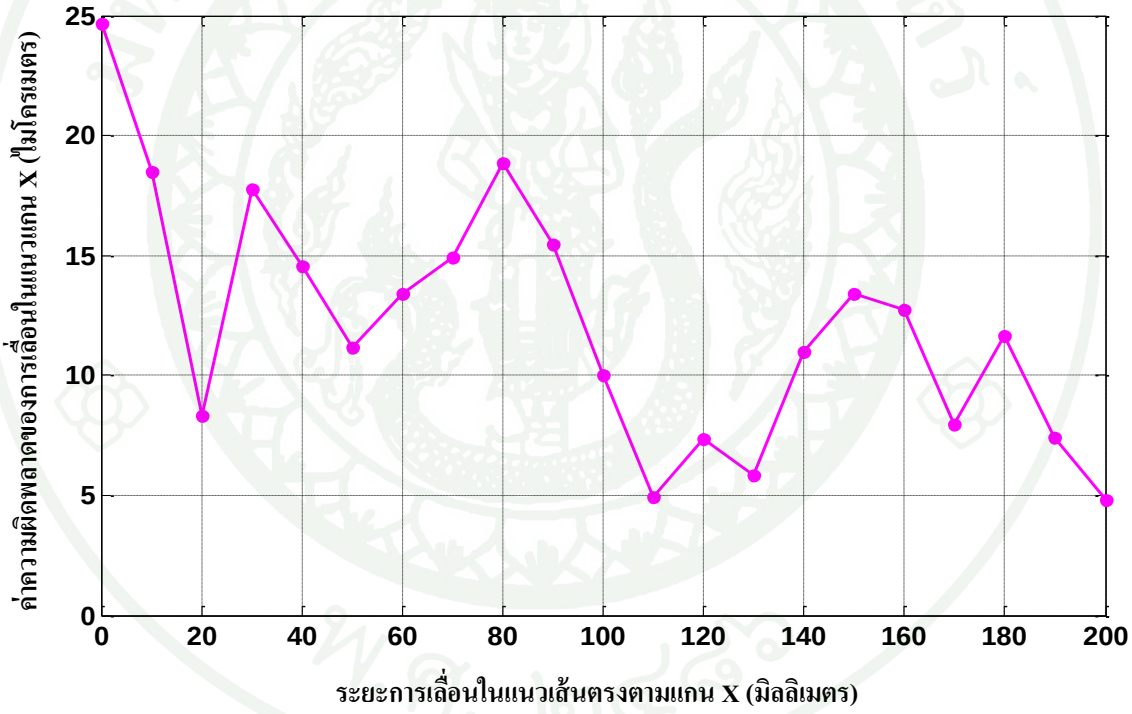
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

เมื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ สามารถสร้างแผนภูมิได้ดังภาพที่ 17

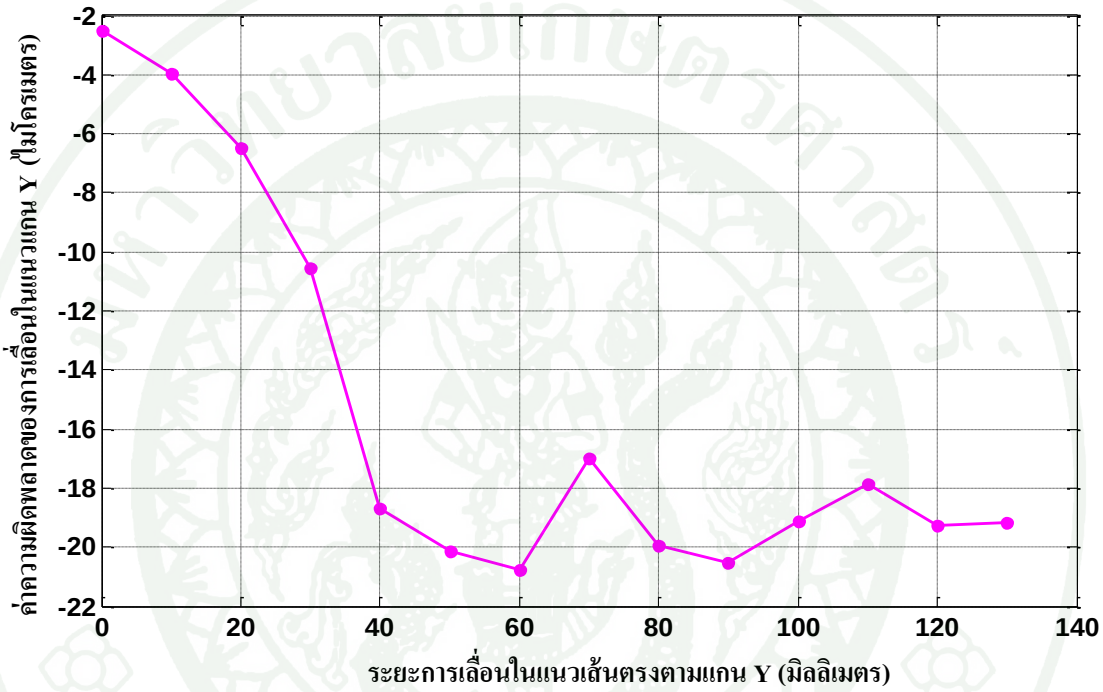


ภาพที่ 17 แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน X

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

เมื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ สามารถสร้างแผนภูมิได้ดังภาพที่ 18

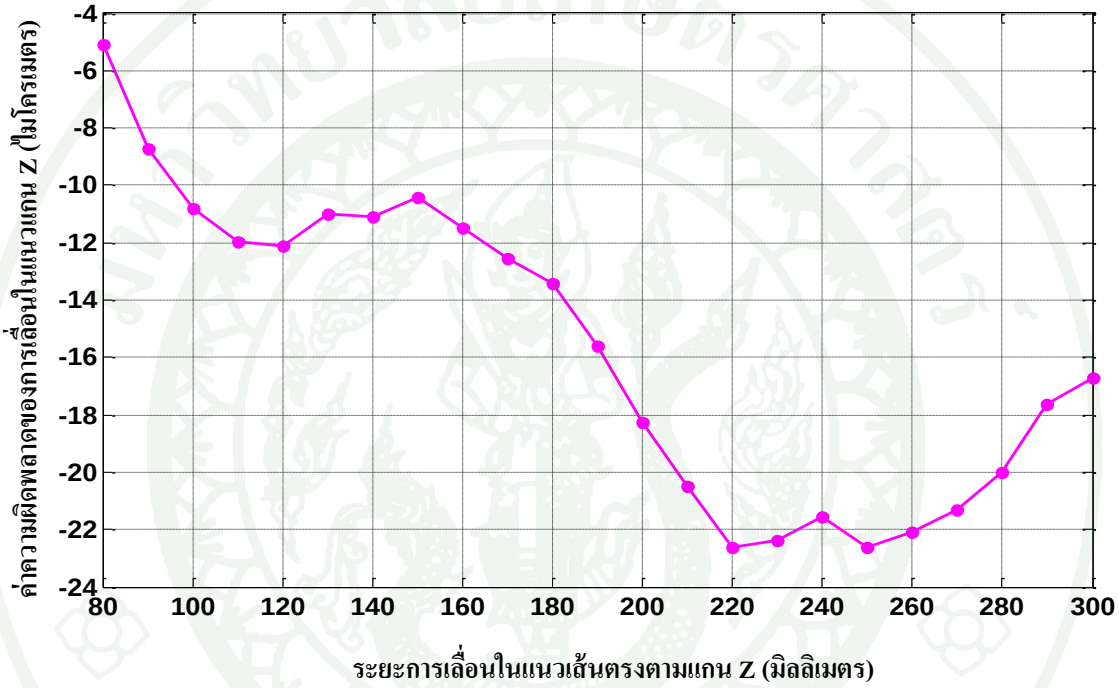


ภาพที่ 18 แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน Y

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

เมื่อวัดค่าความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ สามารถสร้างแผนภูมิได้ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แผนภูมิการการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดในแนวแกน Z

ตารางที่ 1 ค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนตามแนวแกน X Y และ Z

	แกน X	แกน Y	แกน Z
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	12.1288	-15.4268	-15.6495
ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน	19.7981	21.7500	6.2742

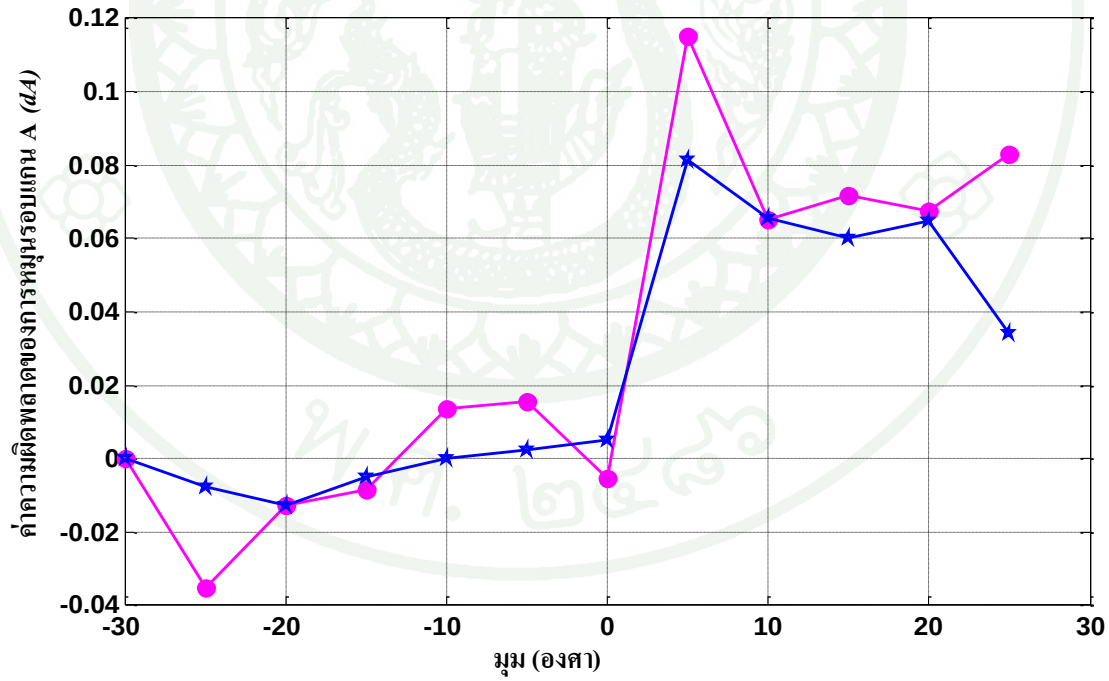
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน A (dA)

ในการทดลองประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน วัดระยะระหว่างสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานโดยคำนวณได้ค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน A จากสมการที่ (12-15) โดยแสดงดังตารางที่2 และสามารถสร้างแผนภูมิได้ดังภาพที่ 20

ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน A (dA)

	ก่อนชดเชยความผิดพลาด	หลังชดเชยความผิดพลาด
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (องศา)	0.0412	0.0282
ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.0136	0.0053
ร้อยละความผิดพลาด(เปอร์เซ็นต์)	-	31.5534



ภาพที่ 20 แผนภูมิค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A ก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด

คือ มุมที่คำนวณได้ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด

คือ มุมที่คำนวณได้หลังชดเชยค่าความผิดพลาด

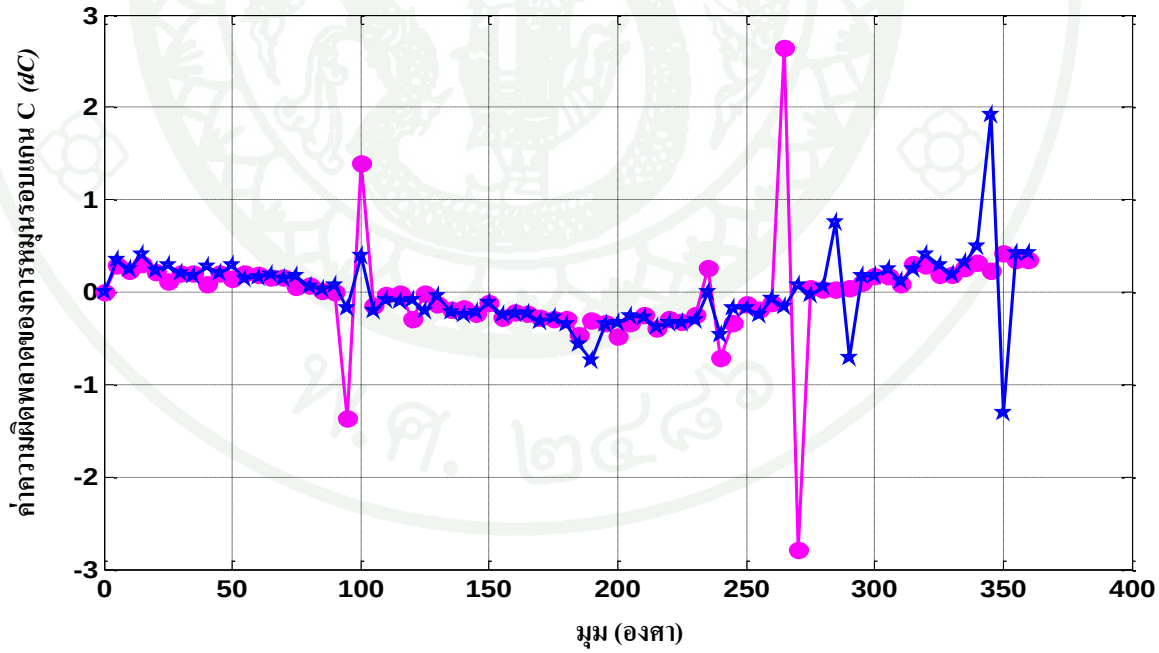
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C (dC)

ในการทดลองประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน วัดระยะระหว่างสปินเดิลทูลและโต๊ะวางชิ้นงานโดยคำนวณได้ค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C จากสมการที่ (9-11) โดยแสดงดังตารางที่ 3 และสามารถสร้างแผนภูมิได้ดังภาพที่ 21

ตารางที่ 3 ผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกน C (dC)

	ก่อนชดเชยความผิดพลาด	หลังชดเชยความผิดพลาด
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (องศา)	0.3114	0.2865
ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.0121	0.0116
ร้อยละความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	-	7.9961



ภาพที่ 21 แผนภูมิค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน C ก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด

คือ มุมที่คำนวณได้ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด

คือ มุมที่คำนวณได้หลังชดเชยค่าความผิดพลาด

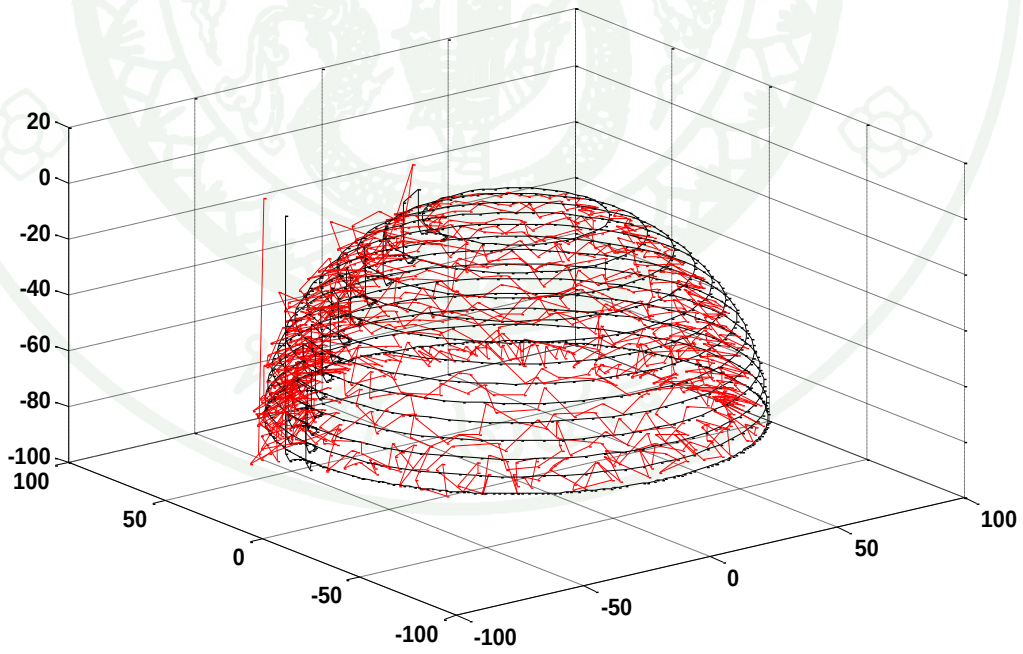
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ผลการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของการหมุนของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนที่ส่งผลต่อชิ้นงานโดยใช้สมการจาโคเบียน

เมื่อแทนค่าความผิดพลาดของการเลื่อนในแนวแกน X Y และ Z และค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A และ C จากการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และการประยุกต์ใช้บอล-บาร์วัดค่าความผิดพลาดตามลำดับ ในสมการที่ (29)

เมื่อจำลองการเดินของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกนด้วยโปรแกรม Unigraphic NX6.0 กำหนดให้เครื่องจักรกัดชิ้นงานเป็นทรงครึ่งวงกลมมีพื้นผิวโค้ง

ภาพที่22 แสดงการเดินของเครื่องจักร เส้นสีดำคือเส้นทางเดินของเครื่องจักรที่มีค่าความผิดพลาดของการหมุนของเครื่องจักร เส้นสีแดงคือเส้นทางเดินของเครื่องจักรที่มีค่าความผิดพลาดจากการหมุนของเครื่องจักรเฉลี่ย สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของชิ้นงานได้ 9.0852 มิลลิเมตร



ภาพที่ 22 แผนภูมิเส้นทางเดินของเครื่องจักรที่เกิดความผิดพลาดของการหมุนก่อนการชดเชยค่าความผิดพลาด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

จากการพิจารณาผลการทดลองในการหาค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกน A และ C โดยประยุกต์ใช้บอล-บาร์พบว่า ในแกน A คำนวณเป็นมุมความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกนเฉลี่ยได้ 0.0412 องศา และเมื่อชดเชยความผิดพลาด อ่านค่าบอล-บาร์เฉลี่ยคำนวณเป็นมุมความผิดพลาดเฉลี่ยได้ 0.0282 องศา ซึ่งมุมที่ผิดพลาดจากการหมุนของแกน A มีค่าลดลง ดังนั้นในการคำนวณค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกนหมุนต่างๆ จากสมการที่(9) ควรคำนึงถึงค่าความผิดพลาดตั้งแต่การติดตั้งของบาล-บาร์ จะสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกนได้แม่นยำ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A ก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด มีค่าความผิดพลาดลดลงร้อยละ 31.5534

ในแกน C อ่านค่าบอล-บาร์เฉลี่ย คำนวณเป็นมุมความผิดพลาดเฉลี่ยได้ 0.3113 องศา และเมื่อชดเชยค่าความผิดพลาด อ่านค่าบอล-บาร์เฉลี่ย คำนวณค่าความผิดพลาดเป็นมุมเฉลี่ยได้ 0.2865 องศา มีค่าความผิดพลาดลดลงร้อยละ 7.9961 ถึงแม้จะสามารถชดเชยค่าความผิดพลาดที่ได้ แต่มีประสิทธิภาพการชดเชยค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่าแกน A เนื่องจากลำดับการติดตั้งขององค์ประกอบของเครื่องจักร พบว่าแกน C อยู่เป็นลำดับแรก ทำให้การหมุนรอบแกน C ค่อนข้างอิสระ เมื่อเทียบกับแกน A ซึ่งมีลำดับถัดจากแกน C ทำให้มีน้ำหนักกดทับจากชิ้นประกอบของเครื่องจักร ทำให้การเคลื่อนที่ของแกน A มีความแม่นยำหรือเสถียรมากกว่า ทำให้การวัดค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A นั้นมีค่าที่แม่นยำมากกว่า เห็นได้จากการชดเชยค่าความผิดพลาดที่มีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดี ในขั้นตอนการชดเชยค่าความผิดพลาดของการเลื่อนในแนวเส้นตรงของแกน X Y และ Z โดยเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นั้น ไม่สามารถชดเชยค่าความผิดพลาดได้อย่างสมบูรณ์คือ ไม่สามารถชดเชยค่าความผิดพลาดได้เป็นศูนย์ ถึงแม้ค่าความผิดพลาด จะมีค่าน้อยมาก แต่ก็ส่งผลต่อ การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน คือการคำนวณค่าความผิดพลาดจากการหมุนโดยค่าที่วัดได้จากบอล-บาร์ จะรวมค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนในแนวแกน X Y และ Z ซึ่งผิดพลาดนี้จะส่งผลต่อการคำนวณมุมที่ผิดพลาดจากการหมุนรอบแกน A และ C ด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้บอล-บาร์เพื่อวัดค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกนหมุนได้แก่แกน A และแกนC จากผลการทดลองก่อนและหลังชดเชยความผิดพลาดสามารถคำนวณค่ามุมที่ผิดพลาดของการหมุนได้ลดลง

แกน A อ่านค่าบอล-บาร์ก่อนการชดเชยค่าความผิดพลาดคำนวณเป็นมุมความผิดพลาดจากการหมุนรอบแกนเฉลี่ยได้ 0.0412 องศา ค่าเบี่ยงเบนจากค่าอุดมคติเฉลี่ยเท่ากับ 0.0851 มิลลิเมตร และเมื่อชดเชยความผิดพลาด อ่านค่าบอล-บาร์เฉลี่ย คำนวณเป็นมุมความผิดพลาดเฉลี่ยได้ 0.0282 องศา ค่าเบี่ยงเบนจากอุดมคติเฉลี่ยเท่ากับ 0.0415 มิลลิเมตร

แกน C อ่านค่าบอล-บาร์ก่อนการชดเชยค่าความผิดพลาดได้ 100.4532 มิลลิเมตร คำนวณเป็นมุมความผิดพลาดจากการหมุนเฉลี่ยได้ 0.3113 องศา ค่าเบี่ยงเบนจากค่าอุดมคติเท่ากับ 0.0532 มิลลิเมตร และเมื่อชดเชยความผิดพลาด อ่านค่าบอล-บาร์เฉลี่ย คำนวณเป็นมุมความผิดพลาดได้ 0.2865 องศา ค่าเบี่ยงเบนจากอุดมคติเท่ากับ 0.0294 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้บอล-บาร์วัดค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกนหมุน A และ C และชดเชยค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกนหมุน จากการการคำนวณตามสมการที่ (9-15) พบว่าค่าความยาวของบอล-บาร์ที่อ่านได้มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น จึงสรุปได้ว่าบอล-บาร์สามารถประยุกต์ใช้วัดค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกนหมุนของเครื่องจักรซีเอ็นซีได้ โดยจะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการวัดค่าความผิดพลาดของการหมุนของแกนหมุน เนื่องจากการใช้เครื่องมือที่วัดโดยตรงเช่น Rotary Encoder มีความซับซ้อนและต้องใช้ความชำนาญสูงในการติดตั้ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวัดค่าความผิดพลาดทางสถิตยศาสตร์ของเครื่องจักรซีเอ็นซีชนิดห้าแกน เมื่อได้ทดลองก่อนและหลังชดเชยค่าความผิดพลาด พบว่าเมื่อชดเชยค่าความผิดพลาด มีผลทำให้ค่าที่อ่านได้จากบอล-บาร์และค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่ลดลงจนถึงศูนย์ อาจมีสาเหตุมาจากสิ่งแวดล้อมในสถานที่ทดลองเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีการสั่นสะเทือนเป็นครั้งคราว ดังนั้น ควรทดลองในสภาวะที่เหมาะสม และควรทำการชดเชยค่าความผิดพลาดที่เหลืออยู่ เพื่อให้ค่าความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A และ C ของเครื่องจักรมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์

ในการวัดค่าความผิดพลาดจากการเลื่อนของเครื่องจักรตามแนวแกน X Y และ Z ควรมีขั้นตอนการตรวจสอบความแม่นยำของการเดินในแนวเส้นตรงของเครื่องจักร หลังจากที่ได้ทำการชดเชยค่าความผิดพลาดในการเลื่อนของเครื่องจักร เพื่อจะสามารถคำนวณมุมที่เกิดจากความผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A และ C ได้แม่นยำกว่า

แต่อย่างไรก็ดี ค่าความผิดพลาดที่ยังเหลืออยู่จากการชดเชยค่าความผิดพลาดนั้น ยังสามารถประเมินค่าความผิดพลาดที่ส่งผลต่อชิ้นงานเมื่อเครื่องจักรเกิดความผิดพลาดทางการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ตัดสินใจในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่นการจัดกระบวนการผลิต กล่าวคือ เมื่อเครื่องจักรเกิดความผิดพลาดดังกล่าวที่ส่งผลต่อชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่ได้จะเกิดความผิดพลาด แต่ก็ยังสามารถนำกระบวนการผลิตอื่น ๆ เช่น การขัด ทำให้ชิ้นงานได้ตามเป้าหมาย ถึงแม้จะเพิ่มกระบวนการผลิต แต่ก็ไม่จำเป็นต้องจัดซื้อเครื่องจักรใหม่ เนื่องจากเครื่องจักรมีความผิดพลาด เป็นการลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

ในการวิจัยต่อไป ควรมีการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่อชิ้นงานอันเนื่องมากจากเครื่องจักรที่เคลื่อนที่ผิดพลาด ในเครื่องจักรห้าแกนที่มีโครงสร้างอื่นๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พรชัย ศรีพัชราวุธ. 2554. **การพัฒนาการวัดค่าความถูกต้องของเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยการขึ้นรูปชิ้นงานมาตราฐาน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภูมเรศ แสงราม. 2553. **การประยุกต์ใช้บอล-บาร์สำหรับชดเชยค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งของแขนกลอุตสาหกรรม 6 องศาอิสระ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรพล รักวิจัย. 2544. **เลเซอร์ทฤษฎีและการประยุกต์.** เพียร์สัน เอ็ดูเคชั่น อินโดไชน่า, กรุงเทพฯ.

Andolfatto, L., S. Lavernhe and J.R.R. Mayer. 2011. Evaluation of Servo, Geometric and Dynamic Error Sources on Five-Axis High-Speed Machine Tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 51 (10–11): 787-796.

Bohez, E.L.J. 2002. Five-Axis Milling Machine Tool Kinematic Chain Design and Analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 42 (4): 505-520.

Buyurgan, N., C. Saygin and S.E. Kilic. 2004. Tool Allocation in Flexible Manufacturing Systems with Tool Alternatives. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.** 20 (4): 341-349.

Chen, X.B., A. Geddam and Z.J. Yuan. 1997. Accuracy Improvement of Three-Axis Cnc Machining Centers by Quasi-Static Error Compensation. **Journal of Manufacturing Systems.** 16 (5): 323-336.

Craig, J.J. 2005. **Introduction to Robotics.** 3rd. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Hsu, Y.Y. and S.S. Wang. 2007. A New Compensation Method for Geometry Errors of Five-Axis Machine Tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 47 (2): 352-360.

Iwasawa, K., A. Iwama and K. Mitsui. 2004. Development of a Measuring Method for Several Types of Programmed Tool Paths for Nc Machine Tools Using a Laser Displacement Interferometer and a Rotary Encoder. **Precision Engineering.** 28 (4): 399-408.

Lamikiz, A., L. López de Lacalle, O. Ocerin, D. Díez and E. Maidagan. 2008. The Denavit and Hartenberg Approach Applied to Evaluate the Consequences in the Tool Tip Position of Geometrical Errors in Five-Axis Milling Centres. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 37 (1): 122-139.

Lei, W.T. and Y.Y. Hsu. 2002a. Accuracy Test of Five-Axis Cnc Machine Tool with 3d Probe-Ball. Part Ii: Errors Estimation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 42 (10): 1163-1170.

Lei, W.T. and Y.Y. Hsu. 2002b. Accuracy Test of Five-Axis Cnc Machine Tool with 3d Probe–Ball. Part I: Design and Modeling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 42 (10): 1153-1162.

Lei, W.T. and Y.Y. Hsu. 2003. Error Measurement of Five-Axis Cnc Machines with 3d Probe–Ball. **Journal of Materials Processing Technology.** 139 (1–3): 127-133.

Mahbubur, R.M.D., J. Heikkala, K. Lappalainen and J.A. Karjalainen. 1997. Positioning Accuracy Improvement in Five-Axis Milling by Post Processing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 37 (2): 223-236.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Onat Ekinci, T., J.R.R. Mayer and G.M. Cloutier. 2009. Investigation of Accuracy of Aerostatic Guideways. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 49 (6): 478-487.

Rahman, M., J. Heikkala and K. Lappalainen. 2000. Modeling, Measurement and Error Compensation of Multi-Axis Machine Tools. Part I: Theory. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 40 (10): 1535-1546.

Raksiri, C. and M. Parnichkun. 2004. Geometric and Force Errors Compensation in a 3-Axis Cnc Milling Machine. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 44 (12–13): 1283-1291.

Shang, P., a. Xu and d. Zhang. 2010. A Dbb-Based Accuracy Measurement Method for Rotary Axes of High Speed 5-Axis Cnc Machining Center, pp. 3551-3554. *In*. **Mechanic Automation and Control Engineering (MACE),** 2010 **International Conference on.**

She, C.-H. and R.-S. Lee. 2000. A Postprocessor Based on the Kinematics Model for General Five-Axis Machine Tools. **Journal of Manufacturing Processes.** 2 (2): 131-141.

Srivastava, A.K., S.C. Veldhuis and M.A. Elbestawit. 1995. Modelling Geometric and Thermal Errors in a Five-Axis Cnc Machine Tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 35 (9): 1321-1337.

Spong, M.W. 2006. **Robotic Modeling and Control.** John Wiley &Sons, Hoboken, N.J.

Tsutsumi, M. and A. Saito. 2003. Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to 5-Axis Machining Centers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 43 (8): 771-780.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Tsutsumi, M. and A. Saito. 2004. Identification of Angular and Positional Deviations Inherent to 5-Axis Machining Centers with a Tilting-Rotary Table by Simultaneous Four-Axis Control Movements. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 44 (12–13): 1333-1342.

Uddin, M.S., S. Ibaraki, A. Matsubara and T. Matsushita. 2009. Prediction and Compensation of Machining Geometric Errors of Five-Axis Machining Centers with Kinematic Errors. **Precision Engineering.** 33 (2): 194-201.

Zargarbashi, S.H.H. and J.R.R. Mayer. 2006. Assessment of Machine Tool Trunnion Axis Motion Error, Using Magnetic Double Ball Bar. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** 46 (14): 1823-1834.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ผลการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ผลการวัดค่าความผิดพลาดของการเลื่อนตามแนวแกน X ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการวัดตำแหน่งการเดินตามเส้นตรงด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (ไมโครเมตร)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
0	0	-11.765	-11.39	57.184	57.095	28.501	29.581	29.946	29.152	38.307
10	-5.973	-17.477	-30.345	44.356	46.527	35.218	29.461	22.979	27.627	32.856
20	-2.225	-19.524	-21.671	-52.685	24.008	41.643	30.101	23.869	26.977	32.518
30	1.427	-7.225	-7.19	-0.656	22.201	42.421	39.976	34.424	20.368	32.077
40	-0.138	-5.858	-14.212	-5.408	21.076	36.269	43.066	32.612	10.079	28.038
50	-12.434	-6.277	-16.214	-5.16	22.915	35.752	39.084	22.244	9.246	22.435
60	-12.873	-11.857	-10.894	3.223	25.917	25.742	50.511	20.843	22.585	20.743
70	-12.853	-6.549	-8.204	3.942	25.226	24.716	49.927	20.238	24.597	28.27
80	-14.77	-9.509	9.347	14.245	24.039	25.348	46.652	39.048	24.981	29.091
90	-21.212	0.812	-7.392	1.34	38.152	14.6	37.136	39.008	23.799	28.139
100	-22.04	-17.558	-13.912	0.318	26.39	12.918	19.588	37.782	19.209	37.54
110	-21.032	-36.2	-11.291	-8.547	20.381	13.656	16.1	34.819	15.989	25.274
120	-15.913	-37.042	-12.704	-0.769	39.541	13.364	10.548	35.196	21.468	20.16
130	-14.861	-19.328	-9.76	-3.254	10.21	2.356	20.021	36.525	19.885	16.688

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
140	2.487	-17.37	0.847	-2.696	13.317	15.397	23.367	33.391	21.865	19.085
150	4.269	10.718	-1.851	-0.221	19.476	5.354	23.042	36.93	12.118	24.109
160	3.731	4.634	7.368	-2.566	17.875	13.392	13.564	34.186	12.943	22.526
170	2.474	-20.78	10.462	0.636	10.574	3.447	21.823	29.94	14.953	5.941
180	-8.581	-9.468	10.372	2.015	11.008	35.229	27.262	26.433	9.36	12.678
190	-21.262	-18.566	6.111	1.444	4.068	26.863	26.03	26.201	6.91	16.329
200	-14.273	-14.194	-0.002	0.014	-7.675	-3.279	26.124	27.018	16.984	17.535

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. . ผลการวัดค่าความผิดพลาดของการเลื่อนตามแนวแกน Y ด้วยเลอเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวัดตำแหน่งการเดินตามเส้นตรงด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
0	0	-0.188	-0.554	-17.695	-18.282	6.525	6.656	-9.237	0	7.922
10	-7.161	0.581	-6.622	-14.05	-16.039	7.689	-1.293	-3.636	-8.848	9.638
20	-2.863	-0.597	-9.684	-22.968	-14.536	6.429	-4.188	-5.656	-11.889	0.982
30	-11.608	-1.595	-13.678	-29.07	-14.966	0.001	-5.474	-7.514	-14.94	-6.807
40	-13.472	0.23	-71.465	-34.913	-13.942	-5.903	-7.169	-5.759	-24.676	-9.931
50	-10.353	4.384	-95.323	-34.248	-11.553	-6.391	-5.424	-6.471	-30.752	-5.195
60	-9.101	5.282	-93.996	-22.505	-10.899	-9.829	-9.985	-10.218	-32.874	-13.612
70	-6.799	5.433	-65.169	-27.094	-11.289	-5.434	-4.981	-6.503	-35.362	-12.731
80	-5.381	13.214	-72.337	-58.634	-13.497	-4.511	-11.566	-8.408	-46.854	8.669
90	-6.058	8.871	-78.606	-51.638	-11.599	-10.132	-15.827	-13.109	-33.106	6.026
100	3.398	10.167	-77.042	-65.428	-11.907	-8.557	-13.81	-13.17	-23.137	8.116
110	5.46	4.864	-39.297	-63.156	-10.67	-11.587	-15.404	-8.041	-25.842	-14.965
120	-1.446	-1.451	-56.767	-56.117	-10.183	-11.078	-14.96	-12.023	-23.335	-5.232

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
130	-1.741	-1.741	-67.51	-62.401	-8.644	-8.645	-17.222	-17.069	-1.484	-5.005

3. ผลการวัดค่าความผิดพลาดของการเลื่อนตามแนวแกน Z ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวัดตำแหน่งการเดินตามเส้นตรงด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
80	0	-1.128	-1.086	-4.02	-3.9	-6.629	-6.641	-9.01	-9.052	-9.642
90	-4.424	-6.305	-7.166	-5.443	-6.843	-12.186	-12.345	-8.941	-11.235	-12.453
100	-6.292	-6.071	-8.979	-11.29	-9.596	-12.479	-13.279	-12.166	-14.165	-13.754
110	-3.944	-9.861	-12.75	-10.65	-11.145	-12.148	-13.297	-16.115	-14.112	-15.631
120	-6.677	-7.789	-9.164	-11.152	-10.556	-14.64	-14.308	-14.029	-16.314	-16.491
130	-7.133	-6.868	-9.329	-8.095	-9.911	-11.115	-12.986	-14.734	-15.141	-14.718
140	-7.516	-5.494	-6.616	-9.007	-10.248	-11.393	-15.235	-13.749	-16.432	-15.353

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก 3 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
150	-4.955	-5.921	-7.716	-10.693	-9.449	-9.934	-13.253	-13.588	-14.874	-13.609
160	-7.905	-7.535	-9.926	-11.082	-9.73	-10.777	-14.087	-12.863	-16.422	-14.726
170	-6.817	-8.803	-10.518	-10.754	-11.703	-13.97	-15.991	-14.016	-16.964	-15.739
180	-9.293	-8.711	-11.456	-11.645	-13.236	-13.634	-17.014	-15.937	-16.59	-16.8
190	-8.952	-10.506	-14.009	-14.229	-15.517	-16.49	-18.617	-17.803	-20.852	-18.938
200	-11.423	-15.027	-17.02	-17.353	-16.714	-18.198	-21.875	-20.853	-21.531	-22.531
210	-12.854	-14.486	-19.848	-18.502	-21.146	-20.125	-22.786	-23.169	-26.303	-25.844
220	-18.224	-18.42	-20.19	-20.561	-22.822	-21.91	-27.672	-25.631	-25.566	-24.984
230	-18.213	-18.394	-22.453	-20.976	-23.146	-19.349	-23.657	-24.194	-26.843	-26.344
240	-15.98	-14.656	-21.67	-17.939	-22.907	-19.373	-25.422	-25.161	-27.17	-25.506
250	-16.373	-17.375	-22.304	-19.238	-22.691	-21.773	-27.295	-26.29	-26.489	-26.566
260	-13.974	-17.194	-22.139	-20.554	-22.722	-22.066	-25.216	-24.236	-26.106	-26.461
270	-14.503	-15.08	-20.11	-18.39	-20.731	-20.186	-26.756	-26.718	-25.766	-24.818
280	-13.695	-12.24	-17.443	-17.654	-21.36	-19.765	-25.558	-24.32	-23.835	-24.008
290	-11.94	-9.169	-17.003	-15.09	-18.936	-18.028	-22.853	-22.204	-20.924	-20.324
300	-10.45	-10.055	-15.607	-15.648	-17.28	-16.714	-21.021	-21.007	-20.429	-18.873

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลการวัดด้วยบอล-บาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ผลการวัดค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกน A จากบอล-บาร์ (มิลลิเมตร)

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความยาวที่วัดได้จากบอล-บาร์ของการทดลองหาค่าความผิดพลาดรอบแกน A

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3		รอบที่ 4		รอบที่ 5	
-30	100.0945	100.0976	100.076	100.0757	100.0709	100.0695	100.0672	100.0673	100.0631	100.0627
-25	100.0912	100.0913	100.0718	100.0713	100.0681	100.0665	100.0633	100.0647	100.0585	100.0572
-20	100.0906	100.0891	100.0698	100.0695	100.0674	100.0655	100.063	100.0638	100.0585	100.0553
-15	100.0914	100.0888	100.0702	100.0677	100.0684	100.0641	100.0635	100.0619	100.0606	100.0556
-10	100.0944	100.0887	100.0724	100.0707	100.0715	100.066	100.0674	100.0634	100.0629	100.0576
-5	100.0952	100.0905	100.0778	100.0716	100.0721	100.0685	100.0684	100.0664	100.0636	100.059
0	100.0983	100.0749	100.0806	100.0749	100.0763	100.0712	100.0718	100.0693	100.0664	100.0623
5	100.1028	100.1161	100.0845	100.0845	100.0786	100.0792	100.0751	100.0756	100.0769	100.0716
10	100.1128	100.1252	100.0956	100.0996	100.0897	100.0864	100.0853	100.0861	100.0811	100.0785
15	100.1225	100.1329	100.1034	100.1049	100.0989	100.0991	100.1011	100.0955	100.0907	100.0922
20	100.1327	100.1419	100.1159	100.1159	100.1093	100.1106	100.1051	100.1057	100.1012	100.1024
25	100.1525	100.1524	100.1200	100.1298	100.1255	100.1253	100.1200	100.12	100.1112	100.1161

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการวัดค่าความผิดพลาดจากการหมุนของแกน C จากบอล-บาร์ (มิลลิเมตร)

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความยาวที่วัดได้จากบอล-บาร์ของการทดลองหาค่าความผิดพลาดรอบแกน C

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
0	100.4676	100.4533	100.4499	100.4533	100.4535
5	100.4675	100.4558	100.4516	100.455	100.4552
10	100.4682	100.4571	100.4531	100.4562	100.4567
15	100.4697	100.4588	100.4547	100.4581	100.4584
20	100.4710	100.4601	100.4559	100.4592	100.4596
25	100.4710	100.4605	100.4569	100.4605	100.4601
30	100.4716	100.4618	100.4581	100.4617	100.4616
35	100.4730	100.4625	100.4594	100.4628	100.4628
40	100.4702	100.4640	100.4607	100.4637	100.4643
45	100.4706	100.4659	100.4615	100.4651	100.4657
50	100.4717	100.4662	100.4626	100.4661	100.4663
55	100.4725	100.4684	100.4632	100.4671	100.4674
60	100.473	100.4686	100.4644	100.4679	100.4701

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
65	100.4742	100.4695	100.4652	100.4685	100.4714
75	100.4744	100.4708	100.4665	100.4702	100.4729
80	100.4748	100.4712	100.467	100.4708	100.4732
85	100.4741	100.4716	100.4672	100.4709	100.4738
90	100.4741	100.4717	100.4675	100.4708	100.4734
95	100.4340	100.4714	100.468	100.4712	100.4737
100	100.4735	100.4715	100.4677	100.4713	100.4744
105	100.4708	100.4706	100.4674	100.4709	100.4743
110	100.4708	100.4708	100.4675	100.4705	100.4734
115	100.4701	100.4704	100.4686	100.4695	100.4738
120	100.4674	100.4694	100.4659	100.4686	100.4726
125	100.4686	100.4686	100.4654	100.4683	100.4725
130	100.4676	100.4684	100.4647	100.4672	100.4716
135	100.4673	100.4675	100.4638	100.4662	100.4692
140	100.4664	100.4662	100.4628	100.4656	100.468

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
145	100.4642	100.4647	100.4621	100.4647	100.4669
150	100.4641	100.464	100.4611	100.4637	100.4663
155	100.4625	100.461	100.4601	100.4628	100.4652
160	100.4614	100.4599	100.4588	100.4615	100.4641
165	100.4605	100.4587	100.4576	100.4601	100.4626
170	100.4588	100.4569	100.4562	100.4591	100.461
175	100.4574	100.456	100.4547	100.4571	100.4592
180	100.4566	100.4543	100.4531	100.4554	100.4575
185	100.4539	100.4521	100.4506	100.4532	100.4550
190	100.4525	100.4486	100.4492	100.452	100.4546
195	100.4503	100.4473	100.4476	100.451	100.4524
200	100.4492	100.4437	100.4465	100.4497	100.4479
205	100.4478	100.4419	100.4452	100.4484	100.4457
210	100.4466	100.4410	100.4440	100.4471	100.4445
215	100.4446	100.4396	100.4435	100.4437	100.4427

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
220	100.4432	100.4382	100.4425	100.4423	100.4412
225	100.442	100.4369	100.4413	100.4412	100.439
230	100.4408	100.4362	100.4402	100.4398	100.4379
235	100.4401	100.4349	100.4493	100.4392	100.4371
240	100.4392	100.4335	100.4384	100.4381	100.436
245	100.4381	100.4326	100.4376	100.4373	100.4326
250	100.4376	100.4317	100.4373	100.4366	100.4324
255	100.4370	100.4313	100.4361	100.4359	100.4315
260	100.4357	100.4308	100.4357	100.4358	100.4315
265	100.4353	100.4306	100.4352	100.4354	100.4912
270	100.4350	100.4304	100.4351	100.4353	100.4307
275	100.4353	100.4304	100.4351	100.4357	100.4309
280	100.4354	100.4306	100.4352	100.4357	100.4310
285	100.4356	100.4299	100.4354	100.4362	100.4314
290	100.4356	100.4305	100.4353	100.4366	100.4314

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ตำแหน่งการเคลื่อนที่	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5
295	100.4361	100.4308	100.4364	100.4367	100.4316
300	100.4368	100.4316	100.437	100.4372	100.4326
305	100.4371	100.4324	100.4378	100.4383	100.4332
310	100.4368	100.4327	100.4383	100.4389	100.4339
315	100.4389	100.4338	100.4397	100.4399	100.4349
320	100.4402	100.4351	100.4411	100.441	100.4360
355	100.4497	100.4454	100.4492	100.4489	100.4456
360	100.4513	100.4471	100.4510	100.4509	100.4471

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณค่ามุมที่ผิดพลาด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. มุมที่คำนวณได้จากการเดินในระนาบ XY

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการคำนวณมุมที่ผิดพลาดของการหมุนรอบแกน C

มุม	ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด	หลังชดเชยค่าความผิดพลาด
0	0.0000	0.0000
5	2.2512	3.2840
10	1.2520	1.0321
15	1.2282	1.2998
20	0.7654	0.6466
25	0.4862	0.7392
30	0.5822	0.4850
35	0.5513	0.3831
40	0.2459	0.6001
45	0.5435	0.4051
50	0.3594	0.5795
55	0.4782	0.2810
60	0.4602	0.3058
65	0.3275	0.3440
70	0.3030	0.2488
75	0.1686	0.3031
80	0.1481	0.1115
85	0.0751	0.0590
90	-0.0143	0.1244
95	0.9399	-0.2949
100	-0.9868	0.6600
105	-0.1948	-0.3477
110	-0.0952	-0.1565
115	-0.0924	-0.1707

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

มุม	ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด	หลังชดเชยค่าความผิดพลาด
120	-0.5397	-0.1583
125	-0.1018	-0.3472
130	-0.3077	-0.0787
135	-0.4227	-0.3866
140	-0.2445	-0.4538
145	-0.1887	-0.4134
150	-0.3482	-0.2277
155	-0.3429	-0.5033
160	-0.4127	-0.4835
165	-0.3976	-0.5264
170	-0.5210	-0.7629
175	-0.5991	-0.7365
180	-0.6377	-1.0440
185	-0.5314	-2.5494
190	0.6266	1.9308
195	0.8103	1.0581
200	1.3051	0.8375
205	0.7419	0.5776
210	0.4997	0.5313
215	0.7437	0.6630
220	0.5373	0.5336
225	0.5297	0.4924
230	0.4183	0.4139
235	-0.4220	0.0088
240	1.0411	0.5796

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

มุม	ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด	หลังชดเชยค่าความผิดพลาด
245	0.4582	0.1966
250	0.1819	0.1928
255	0.2479	0.2594
260	0.1576	0.0773
265	0.5697	0.1606
270	-0.3957	-0.0762
275	-0.0883	0.0305
280	-0.0244	-0.0535
285	-0.0122	-0.8291
290	-0.0922	0.7907
295	-0.1083	-0.1862
300	-0.2415	-0.1975
305	-0.1817	-0.2831
310	-0.1746	-0.1321
315	-0.4373	-0.3040
320	-0.3942	-0.5386
325	-0.2895	-0.4190
330	-0.3301	-0.2911
335	-0.4049	-0.5094
340	-0.5771	-0.9051
345	-0.4586	1.5428
350	-0.8773	-2.9048
355	-0.8198	-1.2394
360	-0.6639	-1.4876

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. มุมที่คำนวณได้จากการเดินในระนาบ YZ

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการคำนวณมุมที่ผิดพลาดของการหมุนรอบแกน A

มุม	ก่อนชดเชยค่าความผิดพลาด	หลังชดเชยค่าความผิดพลาด
-30	0.0000	0.0000
-25	-0.0350	-0.0078
-20	-0.0128	-0.0128
-15	-0.0084	-0.0049
-10	0.0137	0.0000
-5	0.0157	0.0023
0	-0.0055	0.0053
5	0.1152	0.0814
10	0.0702	0.0656
15	0.0667	0.0600
20	0.0676	0.0648
25	0.0831	0.0342

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพัชรินทร์ วาดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 31 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2552-2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์