

การพัฒนาโปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมเครื่องกัด 5 แกน
โดยใช้กระบวนการคำนวณแบบระบบพิกัดทรงกระบอก
The Development LabVIEW Programming for 5-axis Milling Machine
Controller by Using the Cylindrical Coordinate Algorithm

สมฤกษ์ ปุจฉากการ^{1*} จุติวรรษ ภูสีม่วง² เสฏฐวรรธ ศรีระยศ³ สุธรรม ชัมภิตติคุณ⁴
^{1,2,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800
E-mail: somrek.p@eng.kmutnb.ac.th*

Somrek Poodchakarn^{1*} Juthiwat PooSIMUANG² Settawat Srirayos³ Sutham Thammakittikun⁴
^{1,2,3,4}Department of Production Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800
E-mail: somrek.p@eng.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการใช้งานเครื่องกัดชิ้นงานซีเอ็นซี 5 แกน (CNC 5-axis) ในอุตสาหกรรมการผลิตภายในประเทศมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถประหยัดเวลา แรงงาน และทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ได้มีความถูกต้องเที่ยงตรงแม่นยำ ความคลาดเคลื่อนทั้งทางด้านขนาด ตำแหน่ง รูปร่าง และความหยาบผิวเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด โครงการวิจัยและพัฒนาได้ทำการปรับปรุงออกแบบและสร้างเครื่องกัด 5 แกนขึ้น ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) การสร้างระบบกลไกการเคลื่อนที่ของแกนที่ 4 ซึ่งหมุนรอบแกน X และแกนที่ 5 ซึ่งหมุนรอบแกน Z 2) ส่วนของการพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของดอกกัดให้เคลื่อนที่ตัดเฉือนชิ้นงานได้ทั้ง 5 แนวแกน โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยระบบสมการ Denavit-Hartenberg ของแกนที่ 4 และ 5 ร่วมกับระบบพิกัดทรงกระบอก (R, θ , Z) ของชิ้นงาน โดยมีข้อกำหนดให้แนวแกนของดอกกัดต้องทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน อาศัยหลักการเปรียบเทียบค่าความสูงในแนวแกน Z ระหว่างจุดที่ทำการตัดเฉือนกับจุดถัดไปของทางเดินมีดกัดให้อยู่ในระยะความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ผลการประมวลผลแบบวนรอบซ้ำจะทำให้ได้ตัวแปรการเคลื่อนที่ของทั้ง 5 แนวแกน (X, Y, Z, θ_1 , θ_2) ผลการทดลองกัดชิ้นงานรูปร่างนาฬิกาทรายจากชิ้นงานดิบทรงกระบอกวัสดุโพลีเม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm ยาว 40 mm พบว่าการเคลื่อนที่ของดอกกัดเป็นไปตามตัวแปรที่กำหนด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจริง (Average True Percent Error) ของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนเว้าของนาฬิกาทรายประมาณ 2%

คำหลัก เครื่องกัด 5 แกน, ระบบพิกัดทรงกระบอก, Denavit-Hartenberg, โปรแกรม LabVIEW

Abstract

Currently, the CNC 5-axis milling machine are highly used in the domestic production industries. Because of its advantages for reduce a time and labor. The user will always get good quality products, accuracy, precision and acceptable tolerance criteria of size and position, shape and surface roughness from them. The project of this research and development was conducted to design, develop and manufacture the 5-axis milling machine. The main work consisted of 2 parts, 1) Manufacturing a mechanism of the 4th and 5th axis which it has a

rotation about x and z axis, respectively. 2) The development LabVIEW Programming for controlling the motion of a milling cutter to operate a metal removal process with 5 axis, simultaneously. The algorithm used for controlling the motion was developed form Denavit-Hartenberg convention. Thereby the 4th and 5th axes will be a co-operation with the cylindrical coordinate (R, θ , Z) of a work piece. The main criteria of the cutting process was the rotational axis of the cutting tool must be a right angle with the finished surface of work piece. The systematic approach of this criteria was a comparison onto Z axis between the cutting point and the next point of milling router must be a closeness value by a defined tolerance. The results of an iterative computation will give the all of 5 axes motion variables (X, Y, Z, θ_1 , θ_2). The experimental results from the test ran of CNC 5-axis. It could be milling a sandglass geometry-foam material which had the diameter of 40 mm and length of 40 mm of a cylindrical dimension. The cutting tool had a router path followed by the motion control-variables set. The average true percent error of the diameter on a curve of sandglass work piece about 2%

Keywords: 5-axis Milling Machine, Cylindrical Coordinate, Denavit-Hartenberg, LabVIEW Programming

1. บทนำ

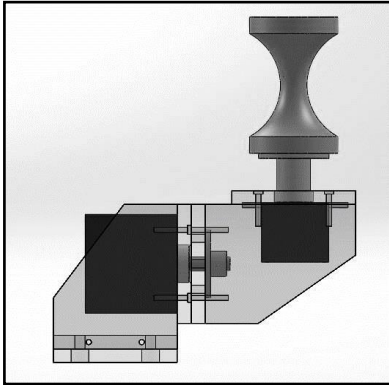
ในปัจจุบันการใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (CNC : Computerized Numerical Control) ในอุตสาหกรรมภายในประเทศมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากข้อดีของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือสามารถประหยัดเวลาแรงงานคน และทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ได้มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตภายนอกประเทศได้ เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ใช้งานในประเทศส่วนใหญ่ ได้แก่ เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจียร และเครื่องเจาะ จากผลงานวิจัย [1], [2] ได้ศึกษาค้นคว้าทำการออกแบบสร้างเครื่องกัด 3 แกน และพัฒนาโปรแกรม LabVIEW [4] สำหรับควบคุมเครื่องกัด 3 แกน ได้จนสำเร็จ งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการต่อเนื่องเป็นการพัฒนาเครื่องกัด 5 แกน โดยทำการติดตั้งชุดขับเคลื่อนของแกนที่ 4 และ 5 ซึ่งจะช่วยให้สามารถกำหนดระนาบในการกัดชิ้นงาน มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยระบบกลไกการทำงานที่เลือกใช้ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 และนำไปติดตั้งกับเครื่องกัด 3 แกน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยโครงงานนี้จะเริ่มจากพื้นฐานการจับยึดชิ้นงานด้วยวัสดุโฟมรูปทรงกรวยและเมื่อทำการตัดเฉือนเสร็จแล้วจะได้เป็นชิ้นงานรูปทรงนาฬิกาทราย หลักทฤษฎีพื้นฐานในกระบวนการตัดเฉือนและกัดชิ้นงานจะเป็นในรูปแบบของการใช้สันคมตัดกัดแนวราบ และกัดข้าง โดยกำหนดให้แกนหมุนของดอกกัดต้องตั้งฉากกับระนาบของพื้นผิวชิ้นงานสำเร็จ [3] โครงสร้างของตัวเครื่องจักรและชุดขับเคลื่อนต่างๆ

จะต้องพยายามออกแบบให้องค์ประกอบต่างๆ อยู่ในแนวทางของเครื่องจักรความแม่นยำสูง (Precision Machine Design) [5] การวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบกลไกการขับเคลื่อนในแนวแกนต่างๆ จะอาศัยหลักการจลนศาสตร์แบบผันตรง คือ การคำนวณหาตำแหน่งที่ปลายของแขนกล (End-effector) โดยต้องทราบค่าตัวแปรแต่ละข้อต่อ (Joint Variables) กรณีข้อต่อแบบหมุนค่าตัวแปรที่ต้องการทราบคือค่ามุม จากนั้นนำค่ามุมที่ทราบค่าในแต่ละข้อต่อไปคำนวณหาค่าพิกัดที่ปลายแขนกลโดยใช้หลักการระเบียบวิธีของ เดนาวิท-ฮาร์เทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg, D-H) เข้ามาช่วยในการกำหนดแกนและหาค่าตัวแปรต่างๆ [6]

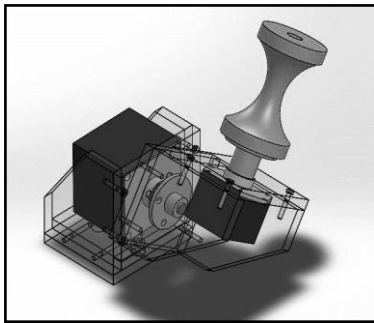
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชุดสมการของการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง [1], [2]

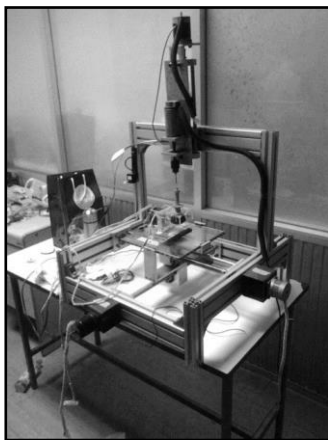
การกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงสำหรับเครื่องกัดจะใช้ระบบพิกัดฉาก โดยมีแนวแกน X, Y, Z เป็นแกนหลัก โดยแกนหลักทั้ง 3 จะต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน และมีทิศทางตามกฎมือขวา โดยมีจุด O เป็นจุดกำเนิด (จุดอ้างอิง) ซึ่งเป็นจุดตัดของแกนทั้ง 3 โดยมีพิกัดอยู่ที่ (X, Y, Z) = (0, 0, 0) ตามมาตรฐานสากล เครื่องกัดจะกำหนดให้แกน Z อยู่ในทิศทางเดียวกับแกนการหมุนของดอกกัด และกำหนดให้ทิศทางของแกน -Z เป็นทิศทางที่มีตัดเฉือนเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่ต้องการกัดขึ้นรูป ส่วนแกน X และ Y กำหนดต่อจากแกน Z โดยใช้กฎมือขวา ดังแสดงในรูปที่ 4



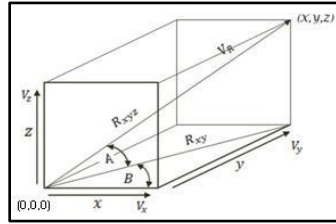
รูปที่ 1 ระบบกลไกขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ของแกนที่ 4 และ 5 และชิ้นงานรูปร่างพิกาทราย



รูปที่ 2 ระบบกลไกขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ของแกนที่ 4 และ 5 ในลักษณะของการขับตรง (Direct Drive)



รูปที่ 3 เครื่องกัด 3 แกน และการติดตั้งชุดกลไกขับเคลื่อนของแกนที่ 4 และ 5 บนโต๊ะงาน x-y



รูปที่ 4 ระบบพิกัดการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง

จากรูปที่ 4 R_{xyz} คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังจุด (X,Y,Z) ใดๆ, A คือ มุมระหว่าง R_{xyz} กับระนาบ XY , B คือ มุมระหว่าง R_{xy} กับแนวแกน X , V_{xyz} คือ ความเร็วลัพธ์ของระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังจุด (X,Y,Z) ใดๆ ส่วน V_x , V_y และ V_z คือ ความเร็วในแนวแกน X , Y และ Z ตามลำดับ จากรูปที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$R_{xyz} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

$$B = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2)$$

$$A = \sin^{-1} \frac{z}{R_{xyz}} \quad (3)$$

$$X = R_{xyz} \cdot \cos A \cdot \cos B \quad (4)$$

$$Y = R_{xyz} \cdot \cos A \cdot \sin B \quad (5)$$

$$Z = R_{xyz} \cdot \sin A \quad (6)$$

และ $V_{xyz} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (7)$

$$V_x = V_{xyz} \cdot \cos A \cdot \cos B \quad (8)$$

$$V_y = V_{xyz} \cdot \cos A \cdot \sin B \quad (9)$$

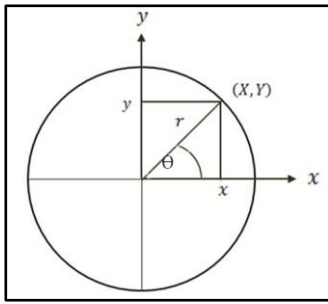
$$V_z = V_{xyz} \cdot \sin A \quad (10)$$

2.2 ชุดสมการของการเคลื่อนที่เชิงเส้นโค้งของวงกลม [1], [2]

จากรูปที่ 5 ตัวแปร r คือ รัศมีของวงกลม ตัวแปร θ คือ มุมที่เปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่ของวงกลม สมการที่ (11), (12) แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่

$$X = r \cdot \cos \theta \quad (11)$$

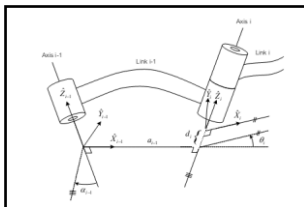
$$Y = r \cdot \sin \theta \quad (12)$$



รูปที่ 5 ระบบพิกัดการเคลื่อนเชิงเส้นโค้งของวงกลม

2.3 การกำหนดตาราง Denavit–Hartenberg [6]

Denavit-Hartenberg Parameters (D-H) เป็นการสร้างตัวแปรเพื่อนำมาใช้ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบกลไกโดยมีการกำหนดแนวแกนให้ชี้ไปตามทิศทางของการเคลื่อนที่ หรือหมุนตามกฎมือขวา ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวได้แก่ 1. Link Length (a_i) คือระยะทางระหว่าง z_i ถึง z_{i-1} โดยพิจารณาตามแกน x_i 2. Link Twist (α_i) คือมุมระหว่างแกน z_{i-1} กับแกน z_i โดยพิจารณามบนแกน x_i 3. Link Offset (d_i) คือระยะทางระหว่าง x_i ถึง x_{i-1} โดยพิจารณตามแกน z_i 4. Joint Angle (θ_i) คือมุมระหว่างแกน x_{i-1} กับแกน x_i โดยพิจารณามบนแกน z_i ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกำหนดกรอบพิกัด และตัวแปรต่างๆ ของ D-H

link	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i
1	L_1	0°	θ_1	0
2	L_2	0°	θ_2	0

ตารางที่ 1. ค่าตัวแปรตามแบบแผนของ D-H เมื่ออ้างอิงจากรูปที่ 6

2.4 การหาเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ [6]

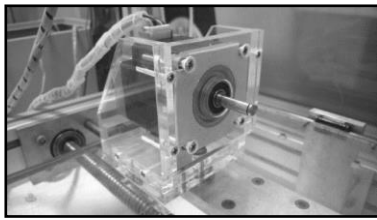
หลังจากที่ได้กำหนดตัวแปรต่างๆ ในตาราง D-H แล้ว ต่อไปทำการหาค่าทรานสฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix : T) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด 4 x 4 ประกอบไปด้วยเมตริกซ์การหมุน และเวกเตอร์การเคลื่อนที่โดยการระบุค่าต่างๆ ในตาราง ลงในสมการ Homogeneous Transformation Matrix ของสมการจลนศาสตร์ผันตรงตามจำนวนชิ้นส่วน (Link) i

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d \sin \theta_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

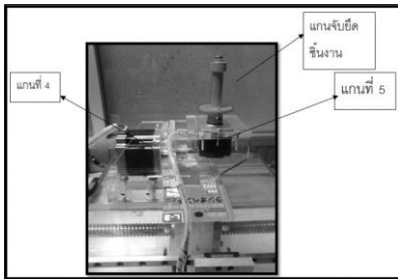
$$T_i^{i-1} = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 \quad (14)$$

3. การออกแบบโครงสร้างเครื่องจักร [1],[2],[5],[7]

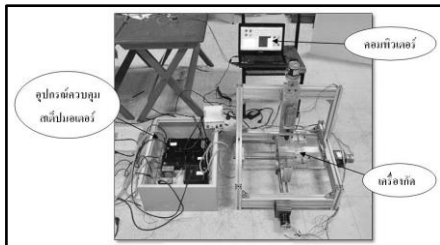
งานวิจัยและพัฒนานี้ ได้ดำเนินงานต่อจากโครงการ [1], [2] โดยโครงสร้างกลไกแขนหมุนของชิ้นงานจะหมุนรอบแกน X หรือแกนที่ 4 และหมุนรอบแกน Z หรือแกนที่ 5 ของเครื่องกัด โดยการประยุกต์ใช้ระบบการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ตามแบบแผนของ D-H และเพิ่มความละเอียดของสเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนแกนที่ 4 จาก 1.8 องศาต่อการเคลื่อนที่ 1 สเต็ป ไปเป็น 0.9 องศาต่อการเคลื่อนที่ไป 1 สเต็ป ซึ่งสามารถเพิ่มความละเอียดได้เป็น 2 เท่าจากเดิม และวัสดุที่ใช้ในการสร้างเป็นพลาสติกอะคริลิกใส ซึ่งมีคุณสมบัติเบา แข็งแรงต่อการกระแทกและการสั่นสะเทือน และเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาโครงสร้างภายในได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 7, 8 และ 9



รูปที่ 7 ชุดขับเคลื่อนแกนที่ 4 ที่ทำการติดตั้งกับเครื่องกัด 3 แกน

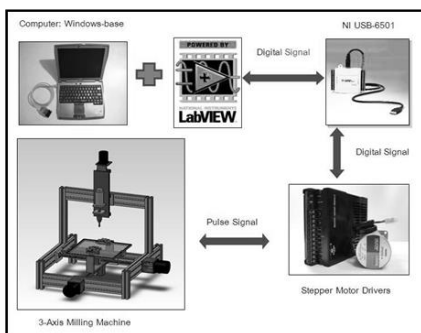


รูปที่ 8 ชุดขับเคลื่อนของแกนที่ 4 และ 5

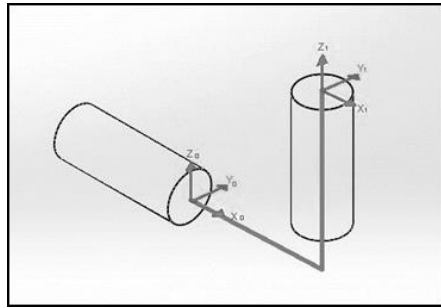


รูปที่ 9 ส่วนประกอบของโครงสร้างเครื่องกัด 5 แกน

จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อสเตปมอเตอร์เข้ากับอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Stepper Motor Driver) และคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระบบควบคุมเครื่องกัด 5 แกน



รูปที่ 11 การสร้างแบบจำลองเพื่อกำหนดค่าตัวแปรในตาราง D-H

3.1 การใช้โปรแกรม Mathematica ช่วยหาสมการสำหรับการเคลื่อนที่ ตามแบบแผนของ D-H

จากการศึกษาหลักการของ D-H พบว่าระบบกลไกของแกนที่ 4 และ 5 นี้จะมีทั้งสิ้นจำนวน 3 Link โดย 2 Link เป็นของแกนที่ 4, 5 และ Link ที่ 3 เป็นของชิ้นงาน ซึ่งนำมาเขียน ดังแสดงในรูปที่ 11 และตารางที่ 2 โดยมีค่าของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าตัวแปรลงในตาราง D-H

Link	θ_i	dz	Dx	ai
1	0	0	66.81	ax1
2	0	66.44	0	0
3	θ_2	0	N3	0

จะได้ชุดตัวแปรของสมการจลนศาสตร์แบบผันตรงของกลไกการเคลื่อนที่ในระบบพิกัด (x, y, z) ดังรูปที่ 12

$$\begin{pmatrix} 66.81 + n2 \cos[\theta z2] \\ -66.44 \sin[\alpha x1] - o2 \sin[\alpha x1] - n2 \cos[\alpha x1] \sin[\theta z2] \\ 66.44 \cos[\alpha x1] - o2 \cos[\alpha x1] + n2 \sin[\alpha x1] \sin[\theta z2] \\ 1 \end{pmatrix}$$

รูปที่ 12 ชุดตัวแปรของสมการจลนศาสตร์แบบผันตรง

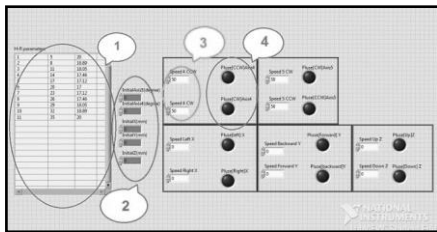
3.2 การเขียนโปรแกรม LabVIEW

ในการเขียนโปรแกรมให้สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกัดให้ทำงานได้นั้น จะมีส่วนประกอบหลักในการเขียนทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 องค์ประกอบของโปรแกรมควบคุมเครื่องกัด

การออกแบบหน้าจอสื่อสารกับผู้ใช้ (Front Panel) ของโปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในรูปที่ 14 และมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้ 1) ตารางค่าความสูงและรัศมีของชิ้นงาน 2) จุดเริ่มต้นของดอกกัดที่อ้างอิงจากจุดแรกของชิ้นงาน 3) ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน และ 4) ไฟแสดงสัญญาณในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน



รูปที่ 14 การออกแบบหน้าจอสื่อสารกับผู้ใช้

4. ผลการทดลอง

การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความแม่นยำตรง (Precision) ของการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง จะแบ่งเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ทีละ 1 แนวแกน ทีละ 2 แนวแกนพร้อมกัน และทีละ 3 แนวแกนพร้อมกัน จำนวน 10 ครั้ง และวัดความคลาดเคลื่อนของแกนที่ 4 และ 5 โดยให้เคลื่อนที่ไป-กลับ ในตำแหน่งเดิม เป็นจำนวน 10 ครั้ง ด้วยความเร็วคงที่สูงสุดเท่าที่ระบบจะสามารถทำได้ คือค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์รวม 10 kHz จากโปรแกรม LabVIEW ส่งสัญญาณพัลส์ (Pulse) แล้วทำการวัดระยะด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยเก็บข้อมูล เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจริง (Average True Percent Error)

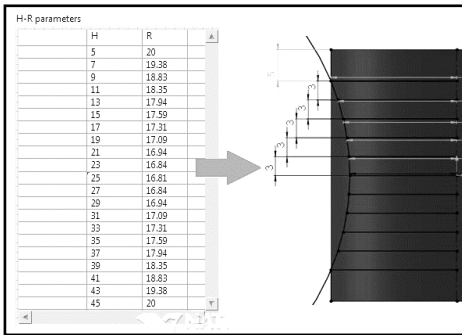
โดยตัวอย่างของผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับตัวอย่างของการกัดชิ้นงานวัสดุโฟม ด้วยชุดคำสั่งการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate Algorithm) แบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 ซึ่งเป็นการแสดงถึงสมรรถนะของโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องกัด 5 แกน

5. สรุป

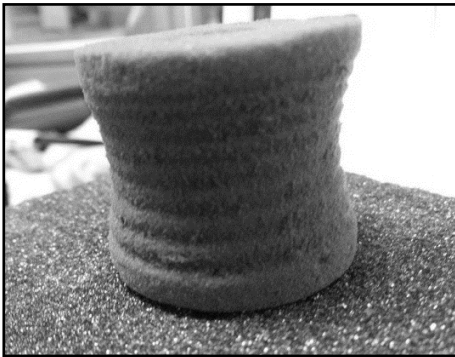
การพัฒนาโปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมเครื่องกัด 5 แกน โดยใช้กระบวนการคำนวณแบบระบบพิกัดทรงกระบอก สามารถทดสอบการทำงานได้อย่างน่าพอใจ โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจริง ของการทดสอบการเคลื่อนที่น้อยกว่า 2% ซึ่งจะเป็นรากฐานของการวิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกล CNC ให้มีสมรรถนะตอบรับกับการทำงานที่ซับซ้อนสูงขึ้นในอนาคต เช่นการพัฒนาเป็นเครื่องกัด 5 แกน ให้สามารถรองรับระบบ G-code และ CAD/CAM เป็นต้น

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแต่ละแนวแกน

รูปแบบการทดสอบ	ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจริง
การเคลื่อนที่ในแนวแกน X ระยะทาง 10 mm	1.05
การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ระยะทาง 10 mm	0.75
เคลื่อนที่ในแนวแกน Z ระยะทาง 10 mm	1.05
การเคลื่อนที่พร้อมกัน 2 แนวแกน คือ X และ Y โดยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเส้นรอบวง 40 mm	1.95
การเคลื่อนที่พร้อมกัน 3 แนวแกน X,Y,Z โดย X=10 mm Y=10 mm และ Z=10 mm วัดเป็นเวกเตอร์ลัพธ์	0.36
การทดลองหมุนแกน Z โดยใช้โปรแกรมสั่งหมุนเป็นมุม 360 องศา	0.8
การทดลองการหมุนรอบแกน x โดยใช้โปรแกรมสั่งหมุนเป็นมุม 90 องศา	0.8



รูปที่ 15 ตัวอย่างชิ้นงานในโปรแกรม SolidWORK กับ ตารางข้อมูลความสูงและรัศมี ในโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 16 การกัดชิ้นงานรูปร่างนาฬิกาทราย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและพัฒนานี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในการใช้โปรแกรม LabVIEW ลิขสิทธิ์ Version 2013 Student Edition และ MSC.Adams Student Edition 2014

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมฤกษ์ ปุจฉาการ, นิพัทธ์ ยืนยาว, สุพัฒน์ พรศิรินพคุณ และ สายันต์ พรายมี. การพัฒนาเครื่องกัด 3 แกน โดยใช้กลไกโต๊ะงาน X-Y แบบอินเวอร์ชันโวลแฮม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555; วันที่ 17-19 ตุลาคม 2555 จังหวัดเพชรบุรี: 197.
- [2] สมฤกษ์ ปุจฉาการ, ซาติชาย วิเชียรรัตน์, ปิยวัฒน์ หนองประทุม, สุธรรม รั้มกิตติคุณ. การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมเครื่องกัด 3 แกน

ด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อรองรับรหัสคำสั่ง G-Code. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556; วันที่ 16-18 ตุลาคม 2556, พัทยา, ชลบุรี

- [3] Alan Overby. CNC Machining Handbook. McGraw Hill Professional; 2010.
- [4] Robert Bishop. LabVIEW 7 Express student edition. Prentice Hall; 2003.
- [5] A.H. Slocum. 1992. Precision Machine Design. Englewood Cliffs. Prentice-Hall. NJ; 1992.
- [6] Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. 1955; Trans ASME J. Appl. Mech 23: 215–221.
- [7] Yitao Duan, Pete Retondo, Robert Hillaire. Three Axis Milling Machine. ME230 Final Project. Fall 1998. University of California at Berkeley. Mechanical Engineering.
- [8] Dehong Huo, Kai Cheng, Frank Wardle. Design of a 5-Axis Ultraprecision Micro Milling Machine–UltraMill: Part 1. Holistic Design Approach, Design Considerations, and Specifications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology April 2010; Volume 47, Issue 9-12, pp 867-877.
- [9] M. Munlin, S.S. Makhanov, E.L.J. Bohez. Optimization of rotations of a five-axis milling Machine near stationary points. 2004; Computer-Aided Design 36: 1117–1128.
- [10] [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 17 มีนาคม 2557]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mscsoftware.com/>
- [11] [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 22 มีนาคม 2557]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.wolfram.com/mathematica/>
- [12] [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 27 มีนาคม 2557]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ni.com/labview/>