

ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ A Control System for the Chula Automatic Faceting Machine

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ¹ และ ปรัชญา พิพัฒนานนท์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889
E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th¹, prachya_p@hotmail.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบควบคุม สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ ในงานเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ เครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติประกอบด้วย การเคลื่อนแบบควบคุมตำแหน่ง 4 แกน และการควบคุมแบบ ปิด-เปิด 2 แกน โดยเป็นการควบคุมการปิด-เปิด และ ส่ายเข้า-ออกของจานเจียรระไน โดยที่สามารถเจียรระไนพลอยได้หลากหลายรูปแบบ นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของพลอยที่ได้จะมีขนาดและคุณภาพที่เท่ากัน

ในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์สร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ แล้วส่งสัญญาณควบคุมออกไปสั่งการให้เครื่องเจียรระไนทำงาน ผ่านทางชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อโปรแกรมควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการสร้างตัวควบคุม และส่วนของหน้าต่างแสดงผลโปรแกรมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โปรแกรมที่สร้างขึ้นมาทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ มีหน้าต่างควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรระไนพลอย แสดงตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกน รวมไปถึงมีหน้าต่างสำหรับการเจียรระไนแบบอัตโนมัติตามโปรแกรมซึ่งผู้ใช้สามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่าง และขนาดของพลอยที่ต้องการลงในโปรแกรม แล้วสั่งให้เครื่องเจียรระไนทำงานตามโปรแกรมที่ตั้งไว้จนเสร็จการทำงาน โดยสามารถเจียรระไนได้ทั้งพลอยที่เป็นลักษณะเหลี่ยมสมมาตร และไม่สมมาตรตามต้องการ

คำหลัก: เครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ / การควบคุมแบบป้อนกลับ / ตัวควบคุมแบบพีไอดี

Abstract

This research work covers a novel design of the controller system, for precision grinding of small-size gem stones, used in the Chula Automatic Faceting machine. The Chula Automatic Faceting Machine has 4-axis high precision motion control and the other 2-axis for spindle and disc swinging. Various style or form of gem stones can be obtained from this faceting machine with uniform size and quality.

In this work, a microcomputer with developed software is used to for control the machine. Practically, the grinding parameters, according to desired form or shape of gem stones, are input to the developed control software, the whole grinding operations are performed automatically by the software through the microcomputer equipped with the faceting machine interface. The software is basically

separated in 2 parts; the controller part and the display part. Feedback control theory is used to design the controller system which PID controller. The display system is operated based on Windows operating system. User can either input directly the position and feed-rate of each axis in the program to control the motion of the grinding process, or input the standard parameters of a gem's shape in the automatic faceting window to automatic faceting process. The machine can facet both of symmetry and dissymmetry shapes depending on parameters input to the software.

Keyword: the Chula Automatic Faceting Machine / Feedback control theory / PID controller

1. บทนำ

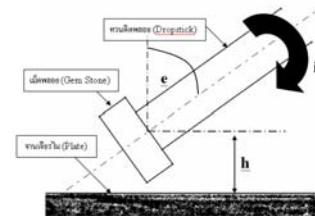
อุตสาหกรรมอัญมณี เป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้เข้าประเทศเป็นเงินจำนวนมาก อุตสาหกรรมอัญมณีคือการนำอัญมณีที่ขุดพบมาผ่านกรรมวิธีการเจียรไนให้มีความสวยงาม ดังนั้นส่วนที่สำคัญในอุตสาหกรรมอัญมณี นั่นคือ อุตสาหกรรมเจียรไนพลอยสี ซึ่งอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ และมีปัญหาเรื่องคุณภาพ ซึ่งแรงงานมนุษย์ไม่สามารถที่จะทำได้ตามปริมาณที่ตลาดต้องการ ทางห้องปฏิบัติการวิจัยควบคุมขั้นสูง จึงทำการ ออกแบบ และสร้างเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติต้นแบบ เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการเจียรไนพลอยให้ได้คุณภาพและปริมาณเพิ่มขึ้น เครื่องจักรดังกล่าว ทำงานแบบอัตโนมัติ โดยควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ทำงานได้เร็วกว่าคนควบคุมคุณภาพได้ดีกว่า แต่ต้นทุนในการสร้างชิ้นส่วนชุดอุปกรณ์ควบคุม และโปรแกรมควบคุม มีราคาสูง จึงได้ทำการพัฒนาปรับปรุงเครื่องเจียรไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ เพื่อลดต้นทุนให้ต่ำลง งานวิจัยนี้ครอบคลุมในส่วนของการออกแบบตัวควบคุม และโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไน ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่อง

เจียรไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ

โครงสร้างของเครื่องเจียรไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติ ถูกออกแบบโดยพิจารณาจากตัวแปรทั้งหมดที่มีผลต่อรูปร่างของพลอย

2.1 ตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในการเจียรไนพลอย



รูปที่ 1 ตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่าง และขนาดของพลอย

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า ในการเจียรไนพลอยนั้นจะมีตัวแปร 3 ตัวที่ต้องทำการควบคุม คือ

2.1.1 มุมดรรชนี(Index Angle: i)

เป็นตัวกำหนดว่าแต่ละเหลี่ยมของพลอยนั้นจะมีทั้งหมดกี่หน้า โดยจะมีเลขดรรชนีเป็นตัวกำกับ การแบ่งมุมดรรชนีที่นิยมใช้คือ 32 , 64 , 80 , 96 , 120 และ 128 มุมดรรชนีต่อเหลี่ยม โดยการแบ่งมุมดรรชนีที่มาก ทำให้การเจียรไนเหลี่ยมละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย โดยแกน Y ของเครื่องเจียรไนเป็นแกนที่ควบคุมตัวแปรนี้

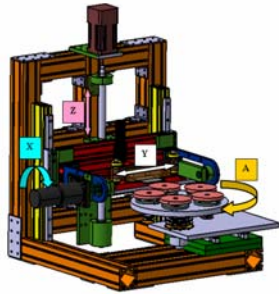
2.1.2 มุมยก(Elevation Angle: e)

เป็นตัวกำหนดมุมของเหลี่ยมพลอยว่าจะให้มีมุมกี่องศา โดยที่มุมนี้จะวัดจากทวนติดพลอยเทียบกับแกนแนวดิ่ง โดยที่แกน X ของเครื่องเจียรไนเป็นแกนที่ควบคุมตัวแปรนี้

2.1.3 ระยะลึกการกัด(Depth of cut: h)

ตัวแปรนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของพลอยที่นำมาเจียรไนแต่ละเม็ด นั่นคือถ้ายิ่งเจียรไนลึกมากขนาดก็จะยิ่งเล็กลง โดยที่แกน Z ของเครื่องเจียรไนจะเป็นแกนที่ควบคุมตัวแปรนี้

2.2 รูปแบบโครงสร้างภายนอก

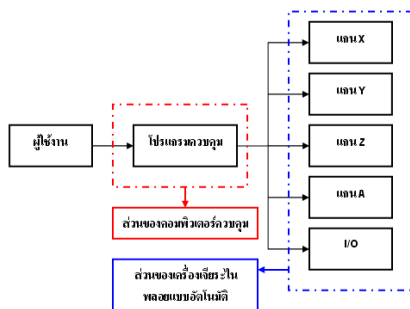


รูปที่ 2 โครงสร้างภายนอกของเครื่องเจียระไน
พลอยจูปาแบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2 เห็นว่าเครื่องเจียระไนพลอยประกอบด้วยแกนการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น 4 แกน คือ แกน X, แกน Y, แกน Z และ แกน A โดยแต่ละแกนจะควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างของพลอยดังกล่าวมาแล้ว ส่วนของชุดจานเจียระไนประกอบด้วยชุดจานเจียระไนทั้งสิ้น 5 จาน แต่ละจานจะมีความละเอียดต่างกันไป เพื่อใช้ในการขึ้นรูปและการขัดเงา

2.3 หลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

การทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ จะทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งควบคุมและประมวลผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง
เจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

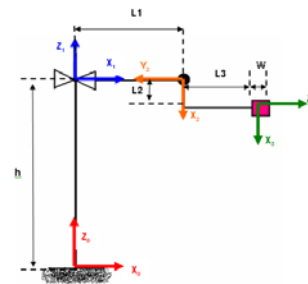
ส่วนของโปรแกรมควบคุมนั้นจะอยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งผู้ใช้งานต้องทำการป้อนตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ เพื่อสั่งการให้เครื่องเคลื่อนที่ในแต่ละแกนตามที่ผู้ใช้กำหนด

ในส่วนของแกน X, Y, Z และ A นั้นเคลื่อนที่โดยอาศัย เซอร์โวมอเตอร์ เป็นตัวขับ และ เอ็นโคเดอร์ เป็นตัววัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ ในส่วนขับเคลื่อนเจียระไนให้หมุนใช้มอเตอร์กระแสสลับในการขับ ส่วนของการลำยชุดจานเจียระไนใช้มอเตอร์กระแสตรง โดยควบคุมแบบ เปิด-ปิด ไม่ได้มีการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วแต่อย่างใด

3. จลศาสตร์ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

การหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติจะพิจารณาที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เทียบกับตำแหน่งของจานเจียระไน ในทิศทางตั้งฉากกับจานเจียระไนเท่านั้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y จะไม่มีผลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เมื่อเทียบกับจานเจียระไน แกนที่มีผลต่อตำแหน่งดังกล่าว มีเพียงแกน Z ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และแกน X ที่ควบคุมมุมยก เท่านั้น

จากลักษณะโครงสร้างของเครื่องเจียระไนพลอย สามารถเขียนแผนภาพจำลอง และติดเฟรม (frame) เพื่อใช้ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องได้ดังนี้



รูปที่ 4 แสดงแผนภาพจำลองของเครื่องเจียระไน
พลอยแบบอัตโนมัติ พร้อมการติดเฟรม

จากรูปที่ 4 กำหนดให้

- h : ระยะการเคลื่อนที่ในการ Z
- $L1$: ระยะจากแนวแกน Z ถึงจุดหมุนของแกน X
- $L2$: ระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงกึ่งกลางของด้ามติดพลอย ตามแนวรัศมีของด้ามติดพลอย

L3 : ระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงตำแหน่งปลายของด้ามติดพลอย ตามแนวแกนของด้ามติดพลอย

W : แทนความสูงของเม็ดพลอย

สามารถนำไปเขียนหาค่า Denevit Hartenberg Parameter ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 Denevit Hartenberg Parameter

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	h	0
2	-90	L_1	0	θ_2
3	90	L_2	$L_3+W/2$	0

3.1. ฟอว์เวิร์ดคิเนมาติกส์ (Forward Kinematics)

จาก DH-Parameter ในตารางที่ 1 สามารถนำมาหา เมตริกซ์การแปลงของแต่ละ link ได้ดังนี้ เมตริกซ์การแปลงของ frame 1 เทียบกับ frame 0 คือ

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์การแปลงของ frame 2 เทียบกับ frame 1 คือ

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_2 & -C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 2 คือ

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & -1 & -L_3 + W/2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จะสามารถหาเมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 0 ได้เป็น

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & L_2C\theta_2 + L_3S\theta_2 + L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_2 & 1 & C\theta_2 & h + (L_3 + W/2)C\theta_2 - L_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ในการควบคุมนั้นสนใจแต่เพียงระยะจากกึ่งกลางพลอย ถึงงานเจียรไนในแนวตั้งฉากกับงาน

เจียรไนเท่านั้น สามารถหาระยะทางดังกล่าวได้จากสมการ

$$z = h + \left(L_3 + \frac{W}{2} \right) C\theta_2 - L_2S\theta_2 \quad (1)$$

ซึ่ง ค่า h และ θ_2 สามารถอ่านได้จาก

อุปกรณ์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ในแกน Z และ X ตามลำดับ ในขณะที่ค่า L_2 , L_3 และ W สามารถหาได้จากการวัดจริง ที่เครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ และขนาดของพลอย

3.2 อินเวอร์สคิเนมาติกส์ (Inverse Kinematics)

ขณะที่เครื่องเจียรไนพลอยทำงาน ผู้ใช้จะทราบระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางพลอยไปยังงานเจียรไนจากสมการ (1) เนื่องจากทราบตำแหน่งในแกน Z และตำแหน่งในแกน X แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการสั่งให้จุดศูนย์กลางเม็ดพลอยอยู่ห่างจากงานเจียรไนเป็นระยะทางเท่าไรนั้น จำเป็นที่จะต้องหา Inverse Kinematics ในแนวแกน Z มาใช้ โดยกำหนดมุมยกในแกน X ไว้ก่อน จากนั้นสั่งไปว่าต้องการให้จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอยห่างจากงานเจียรไน เป็นระยะเท่าไร โปรแกรมจะทำการคำนวณหา ตำแหน่งปลายที่ต้องเคลื่อนที่ไป ในแนวแกน Z (ระยะ h) ออกมา และสั่งให้ แกน Z วิ่งไปที่ตำแหน่งดังกล่าวจากสมการ (1) จะได้ว่า

$$h = z - \left(L_3 + \frac{W}{2} \right) C\theta_2 + L_2S\theta_2 \quad (2)$$

4. หลักการในการควบคุมการทำงานเครื่อง

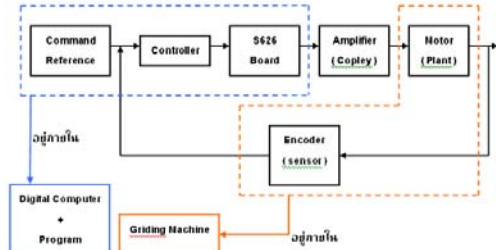
เจียรไนพลอยจุ่มแบบอัตโนมัติ

การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอยจุ่มแบบอัตโนมัติ นั้น เคลื่อนที่โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากเซอร์โวมอเตอร์

4.1 การควบคุมเครื่องเจียรไนพลอยจุ่มแบบอัตโนมัติ

การควบคุมเครื่องเจียรไนพลอยจุ่มแบบอัตโนมัติ ใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) ในการควบคุมการทำงาน ระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด แล้วเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ เพื่อพิจารณาค่าผิดพลาด ซึ่งค่าผิดพลาด

จะถูกนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมเพื่อลดให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด การควบคุมแบบป้อนกลับดังที่กล่าวมานี้สามารถแสดงเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

4.2 ตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

เครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติต้องการความแม่นยำในแต่ละแกนสูงจึงได้เลือกตัวควบคุมแบบ PID มาใช้ในการควบคุม ซึ่งในการควบคุมจะต้องใช้รูปแบบตัวควบคุมในลักษณะของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ดังนี้

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + K_i T e(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (3)$$

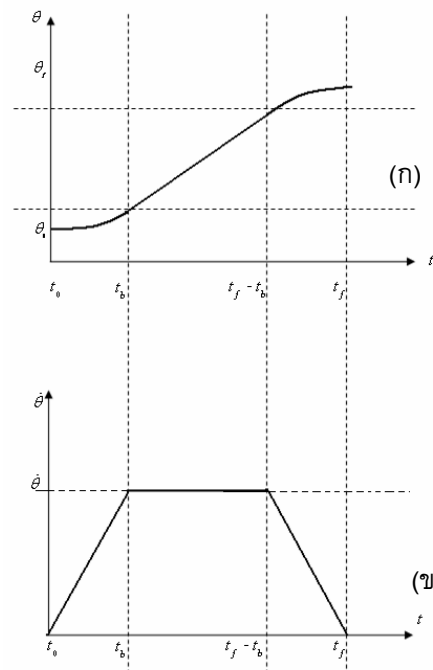
โดยสมการที่ 3 คือสมการของตัวควบคุมที่จะใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไน โดยค่า K_p , K_i และ K_D คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน, ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ซึ่งก่อนการใช้งานต้องทำการปรับตั้งค่าอัตราขยายเหล่านี้ เพื่อให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่ค่า T คือ ช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล โดยในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มเป็น 1,000 Hz. หรือ 0.001 วินาที

4.3 ลักษณะของค่าสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปขับมอเตอร์

การเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ คำนึงถึงการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดปลายอีกด้วย หรือที่

ในเครื่องจักรอัตโนมัติทั่วไปเรียกว่า Feed ของการเคลื่อนที่ การควบคุมดังกล่าวขึ้นกับสัญญาณอ้างอิงที่ถูกส่งไปขับมอเตอร์ โดยในการควบคุมได้ใช้สัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเชิงเส้น ผสมกับพาราโบลา

(Linear function with parabolic blend) ลักษณะสัญญาณอ้างอิงแสดงได้ดังรูปที่ 6 การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ ในขณะเริ่มต้นเคลื่อนที่นั้นความเร็วจะเป็นศูนย์แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับขณะถึงจุดปลายความเร็วจะค่อยๆลดลงจนความเร็วเป็นศูนย์ มีผลให้การเคลื่อนที่ราบเรียบและนุ่มนวล



รูปที่ 6 สัญญาณแบบเชิงเส้น ผสมกับพาราโบลา

(ก) แสดงสัญญาณตำแหน่ง

(ข) แสดงสัญญาณความเร็ว

การจะสร้างสัญญาณลักษณะแบบนี้จำเป็นต้องทราบค่าต่างๆที่จำเป็นก่อนดังนี้

θ_0 คือ ตำแหน่งเริ่มต้นที่จะเริ่มเคลื่อนที่

θ_f คือ ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการเคลื่อนที่ไปถึง

t_f คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด

ค่าทั้งสามนี้ คือค่าที่ต้องกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้สั่งการเคลื่อนที่ ซึ่งจากค่าเหล่านี้จะนำไปหาค่าอื่นๆที่ใช้ในการสร้างสัญญาณส่งออก ดังนี้

หาค่า $\ddot{\theta}$ จาก $\ddot{\theta} = \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2} + 1$ (3)

หาค่า t_b จาก $t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}^2 t^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}}$ (4)

หาค่า $\dot{\theta}$ จาก $\dot{\theta} = \ddot{\theta} t_b$ (5)

สมการที่ใช้สร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่คือ

ช่วงที่ 1 ($t_0 \rightarrow t_b$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + 0.5 \ddot{\theta} t^2 \quad (6)$$

ช่วงที่ 2 ($t_b \rightarrow t_f - t_b$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) \quad (7)$$

ช่วงที่ 3 ($t_f - t_b \rightarrow t_f$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

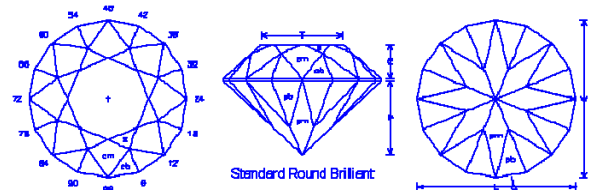
$$\theta = \theta_0 - 0.5 \ddot{\theta} (t_f - (t_f - t_b))^2 + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + \ddot{\theta} t (t_f - t_b) \quad (8)$$

5. การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรในพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

การออกแบบรูปร่างโปรแกรมคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งาน นั่นคือความสะดวกในการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นหลัก โดยอาศัยแนวคิดดังนี้

5.1. ลักษณะการให้ขนาด และการบอกรูปร่างพลอย

พิจารณาถึงการบอกรูปร่างและขนาดของพลอยที่เป็นสากล เพื่อความสะดวกสำหรับผู้ใช้ในการป้อน ขนาดและรูปร่างของพลอยที่ต้องการ ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอยที่เป็นมาตรฐานนั้นจะไม่ได้บอกเป็นขนาดตายตัวแต่จะบอกเป็นลักษณะอัตราส่วน เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้กับพลอยทุกๆขนาดตามแต่ต้องการ ในส่วนของการบอกรูปร่างของพลอย จะบอกในรูปแบบของตัวแปรที่มีผลต่อเหลี่ยมมุมของพลอย คือ มุมยก (e) และ มุมดรรชนี (i) โดยจะบอกว่า ต้องเจียรในมุมยกใดบ้าง และในมุมยกนั้นๆจะเจียรในมุมดรรชนีใดบ้าง ตัวอย่างของการบอกขนาดและรูปร่างของพลอยแสดงได้ดังนี้



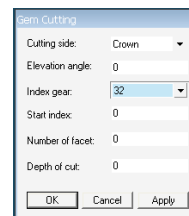
L/W = 1.000 T/W = 0.506 T/L = 0.506	P/W = 0.466 C/W = 0.122
H/W = (P+C)/W+0.02 = 0.608	P/H = 0.766 C/H = 0.201

ตารางที่ 2 ตารางแสดงการบอกรูปร่างของพลอย

5.2. การใช้งานร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด (CU - Solid)

โปรแกรมซียู-โซลิด คือโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเหลี่ยม และรูปร่างของพลอยที่ต้องการเจียรใน พัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยของห้องปฏิบัติการผู้ใช้สามารถป้อนขนาดพลอย เหลี่ยม มุม และความลึกในการกัด เพื่อให้ได้พลอยที่มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ ในการใช้เครื่องเจียรในพลอยอัตโนมัตินั้นต้องการที่จะใช้ร่วมกับตัวโปรแกรม ซียู-โซลิด ดังนั้นจึงต้องศึกษาการใช้งานของโปรแกรมว่า ในการวาดรูปพลอยโดยใช้ ซียู-โซลิดนั้น ใช้พารามิเตอร์ใดบ้าง เพื่อจะได้ออกแบบโปรแกรมให้รับค่าเหล่านั้น

การวาดพลอยด้วยโปรแกรมจะต้องมีการกำหนดเหลี่ยม และรูปร่างของพลอยลงในโปรแกรม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนสำหรับสร้างเหลี่ยมพลอย

จะเห็นว่า ในการสร้างเหลี่ยม และมุมของพลอยให้ได้ตามต้องการ ต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้ครบซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ก็คือตัวแปรในการเจียรในพลอยทั้งสิ้น โดยจะนำเอาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ใส่ลงใน

โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระไนเพื่อ
สั่งให้เครื่องทำงานต่อไป

5.3. ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม

โปรแกรมที่สร้างขึ้นใช้ชื่อว่า CU Gems
Grinding เป็นลักษณะโปรแกรมที่ทำงานบนระบบ
วินโดวส์ ลักษณะของโปรแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 หน้าต่างของโปรแกรม และส่วนประกอบของ
โปรแกรม

ส่วนนี้เป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องในแต่ละ
แกน โดยผู้ใช้เป็นผู้สั่งการเอง ในขณะที่ส่วนของการ
เจียรระไนแบบอัตโนมัติตามโปรแกรมสามารถแสดงได้
ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงหน้าต่างควบคุมการเจียรระไนพลอยแบบ
อัตโนมัติ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นำมาจากโปรแกรม ซ็ยู-โซลิต
แล้วใส่ลงในโปรแกรม เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำงาน

6. การทดลอง และ ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้การทดลองจะแบ่งเป็น 2 การทดลองดังนี้

6.1 การทดลองหาอัตราขยาย เพื่อใช้ในการ ควบคุมมอเตอร์แต่ละแกน

ในการทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อหาค่า
อัตราขยายที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุม เพื่อควบคุม
การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนได้แม่นยำ และราบเรียบ
หากกำหนดอัตราขยายไม่เหมาะสม จะทำให้การ
เคลื่อนที่ที่เกิดภาวะไร้เสถียรภาพได้ (Unstable) ซึ่งอาจ
มีผลให้เครื่องเจียรระไนพลอยเกิดความเสียหาย การหา
อัตราขยายนั้นจะมีค่าอัตราขยายอยู่ 3 ตัว คือ Kp, Ki
และ Kd ทำการทดลองโดยสุ่มค่าอัตราขยาย โดยเก็บ
ค่าสัญญาณขาเข้า และขาออกมาสร้างเป็นกราฟ
เปรียบเทียบ และพิจารณาจากค่าความผิดพลาด ว่า
มากน้อยเพียงใด ลักษณะการตอบสนองเป็นเช่นไร

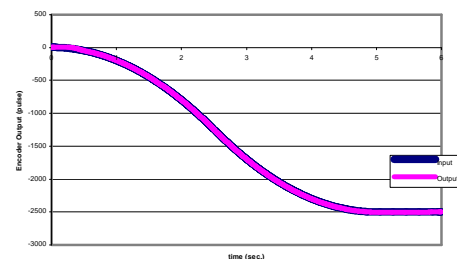
6.1.1. การหาอัตราขยายของตัวควบคุม

ในแกน X

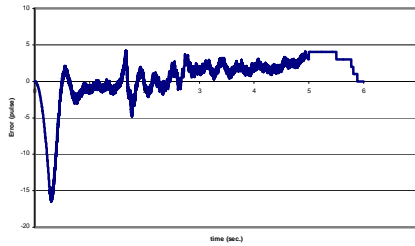
ในการทดลองของแกนนี้ กำหนดให้มอเตอร์
เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่มุมยกเป็น 0 องศา หรือ
ตำแหน่งอ้างอิงของแกน X นั้นเอง เป็นจุดเริ่มต้น แล้ว
เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุมยกเป็น 90 องศา

ผลการทดลอง

พบว่าที่อัตราขยายของตัวควบคุมดังนี้ $Kp = 0.02$, $Ki = 0.1$ และ $Kd = 0.0001$ จะได้ลักษณะ
ของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 10
และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 11 ซึ่งพบว่า
เมื่อเริ่มเคลื่อนที่แล้ว การเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่าง
ราบเรียบตามแนวสัญญาณอ้างอิง ตลอดการเคลื่อนที่
ค่าสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า
และสัญญาณตอบสนองในแกน X



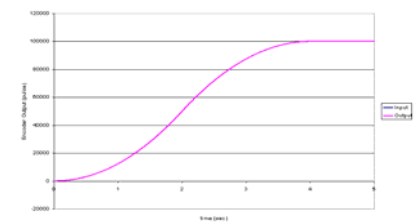
รูปที่ 11 แสดงสัญญาณผิดพลาดในแกน X

6.1.2. การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน Y

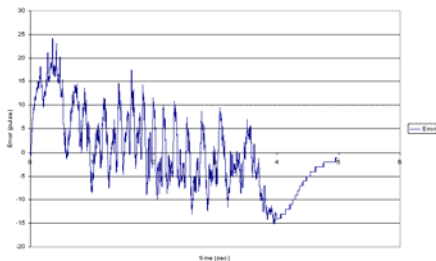
ในการทดลองของแกนนี้ กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z เป็นจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนลงไปยังตำแหน่งที่ตามติดพลอยเกือบจะสัมผัสกับงาน

ผลการทดลอง

พบว่าที่อัตราขยายเป็น $K_p = 0.002$, $K_i = 0.01$, และ $K_d = 0.0001$ ทำให้ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 12 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 13 พบว่าที่ตำแหน่งจุดปลาย ค่าสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็น -1 พัลส์ซึ่งในชุดอุปกรณ์จับตามพลอยนั้นมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบมอเตอร์ฮาร์โมนิกไดรฟ์ (Harmonic Drive Motor) ซึ่งมีอัตราทดที่ค่อนข้างสูงมาก ดังนั้นความผิดพลาดในระดับ -1 พัลส์ถือว่าน้อยมาก



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน X



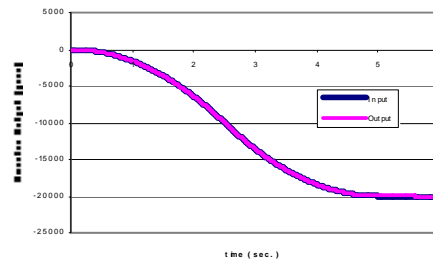
รูปที่ 13 แสดงสัญญาณผิดพลาดในแกน X

6.1.3. การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน Z

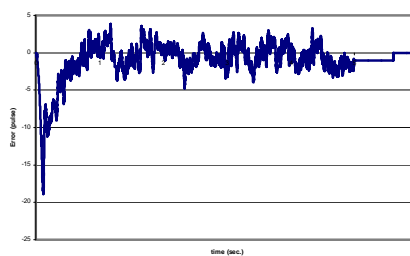
ในการทดลองของแกนนี้ กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z เป็นจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนลงไปยังตำแหน่งที่ตามติดพลอยเกือบจะสัมผัสกับงาน

ผลการทดลอง

พบว่าที่อัตราขยายเป็น $K_p = 0.1$, $K_i = 0.5$ และ $K_d = 0.0005$ ทำให้ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 14 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 15 เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่าสัญญาณผิดพลาด จะเห็นว่ามีการสั่นของสัญญาณผิดพลาดอยู่บ้าง และค่าสัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายเป็นศูนย์



รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน Z



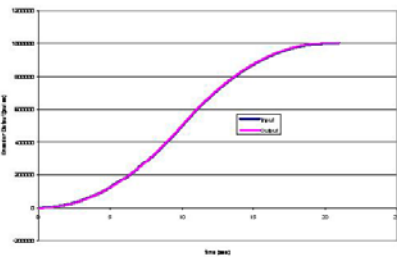
รูปที่ 15 แสดงสัญญาณผิดพลาดในแกน

6.1.4. การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน A

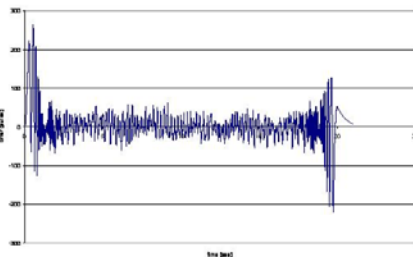
ในการทดลองของแกนนี้ กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่หมุนให้ชุดเปลี่ยนงานเจียรระในหมุนรอบตัวเอง

ผลการทดลอง

พบว่าที่ค่าอัตราขยายเป็น $K_p = 0.0008$, $K_i = 0.003$ และ $K_d = 0.00001$ ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 16 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 17 พบว่าค่าสัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายไม่เป็นศูนย์ สัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งปลาย อ่านได้ 8 พัลส์ ซึ่งเมื่อทำการแปลงให้เป็นหน่วยองศาจะพบว่าตำแหน่งของจานเจียร์ไนเพียงไปเพียงแค่ 0.00288 องศาเท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก



รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน A



รูปที่ 17 แสดงสัญญาณผิดพลาดในแกน A

6.2 การทดลองใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ

การทดลองจะทำการเจียร์ไนพลอยรูปร่าง Standard Round Brilliant ดังตารางที่ 2 ด้วยเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมควบคุมการทำงาน ซึ่งจะพิจารณาดำเนินการเคลื่อนที่ และรูปร่างของพลอยที่ได้

ผลการทดลอง

จากการทดลองเจียร์ไนพลอยตามรูปร่างดังกล่าว พบว่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีความแม่นยำ และเหลี่ยมพลอยที่ได้ในการเจียร์ไนมี

ลักษณะที่เท่ากัน จากรูปที่ 18 พลอยที่ขึ้นเหลี่ยมเสร็จแล้วจากเครื่องเจียร์ไน



รูปที่ 18 ชุดพลอยที่เจียร์ไนเหลี่ยมแล้ว

ซึ่งหลังจากขึ้นเหลี่ยมแล้วต้องทำการขัดเงาเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยพลอยที่ผ่านการขัดเงาแล้วแสดงไว้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 พลอยที่ผ่านการเจียร์ไน

7. ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ สามารถเคลื่อนที่ได้แม่นยำตามที่ผู้ใช้งาน แต่ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนขณะที่ทำการเจียร์ไน ทำให้พลอยที่ได้ยังมีปัญหาเรื่องผิวหน้าอยู่บ้าง ซึ่งต้องทำการแก้ไขที่ตัวเครื่องต่อไปเพื่อลดการสั่นสะเทือนดังกล่าว

8. เอกสารอ้างอิง

8.1 รายงาน

[1] นายสมจินต์ ชนานันท์ศิริ , “ การออกแบบและสร้างเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ ” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2547

8.2 หนังสือ

- [1] วิบูลย์ แสวีระพันธุ์ศิริ. “ การควบคุมระบบ
พลศาสตร์. “ , สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2548
- [2] John J. Craig., 1955, Introduction to robotics:
Mechanics and control, 2nd edition