



รายงานโครงการวิศวกรรมเครื่องกล

การพัฒนากระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิจิเจียร์ใน

Proposal Report of Mechanical Engineering Project

Manufacturing process of the prosthetic femur with robotic grinding method

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ผศ.ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ
ผศ.ดร. ขัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี

สมาชิกโครงการ

นาย กฤชฎ์ อดิเรกสาร	6130014521
นาย ชานน นาวินูลวงศ์	6130119821
นาย พิชากร หวังเจริญวงศ์	6130364121

การวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต
รายวิชา 21303499 โครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

โครงการพัฒนาระบบผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ในงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการผลิตก้านสะโพกเทียมให้มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการปลูกถ่ายให้ผู้ป่วย พื้นผิวของก้านสะโพกเทียมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องสนใจ เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตก้านสะโพกเทียมยังไม่สามารถทำให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ และยังต้องใช้แรงงานควบคู่กับการผลิตด้วยเครื่อง CNC ทำให้ใช้เวลาในการผลิตนานเกินกว่าความต้องการของผู้ป่วย โครงการนี้จึงมุ่งเป้าในการพัฒนาวิธีการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยวิธีควบคุมหุ่นยนต์ไปเจียร์ในก้านสะโพกเทียมที่ผลิตมาด้วยวิธีหล่อขึ้นรูปแบบ Near-net-shape ให้มีพื้นผิวที่เรียบตรงตามความต้องการทางการแพทย์ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมปัจจุบันเพื่อสร้างการโปรแกรมการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับเจียร์ในรูปแบบระบบอัตโนมัติและใช้เวลาดำเนินการน้อยลงกว่าการผลิตรูปแบบเดิม สำหรับขอบเขตในการศึกษาของโครงการนี้มีตั้งแต่การหาข้อมูลเกี่ยวกับหลักการทำงานของหุ่นยนต์ การจัดหาอุปกรณ์และจัดเตรียมสถานที่ในการทำงาน การออกแบบวิธีเจียร์ในให้เหมาะสมสมสำหรับก้านสะโพกเทียม การสร้างโปรแกรมประยุกต์ใช้ข้อมูลเพื่อสื่อสารไปยังหุ่นยนต์และการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมสำหรับเจียร์ใน นอกจากนี้โครงการนี้ยังมีเป้าหมายเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ที่สำคัญด้านการประยุกต์การใช้งานหุ่นยนต์ระบบอัตโนมัติร่วมกับอุตสาหกรรมอื่นในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ และ ผศ.ดร.ชัยญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาทั้ง 2 ท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้ค่อยแนะนำ ชี้แนะแนวทางความคิด ปรับปรุง และเสนอแนวทางต่าง ๆ ตลอดการวิจัยนี้ ทั้งในด้านความรู้ ความคิด และ คุณธรรม ขอขอบพระคุณอาจารย์ท่านอื่นๆทุกท่านที่ค่อยสั่งสอนบ่มเพาะความรู้ในแขนงต่าง ๆ นอกจากนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ทุก ๆท่านและ เพื่อนร่วมรุ่นทุก ๆคนในห้องวิจัย Biomechanical Design and Manufacturing ที่ค่อยให้ความช่วยเหลืองานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งด้านความรู้เชิงพาททาง และกำลังใจ ทั้งหมด สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นแหล่งความรู้และข้อมูลเพื่อการทำงานวิจัยนี้ และสนับสนุนการศึกษาตลอด 4 ปีในสถานที่แห่งนี้เป็นอย่างดี

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

- 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย
- 1.2 จุดประสงค์
- 1.3 ขอบเขตการวิจัย
- 1.4 แผนการดำเนินงาน
- 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ปริทรรศ์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- 2.1 ปริทรรศ์วรรณกรรม
 - 2.1.1 ก้านสะโพกเทียมในปัจจุบัน
- 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
 - 2.2.1 CAM
 - 2.2.2 CAD
 - 2.2.3 CNC
 - 2.2.4 หลักการทำงานของแขนหุ่นยนต์
 - 2.2.4.1 ประเภทการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
 - 2.2.4.2 เส้นวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Moving statement)
 - 2.2.5 จลดาสตร์ตรงของแขนกล (Forward kinematic of manipulator)
 - 2.2.5.1 Denavit hartenberg
 - 2.2.6 จลดาสตร์ผกผันของแขนกล (Inverse kinematic of manipulator)
 - 2.2.7 ความเร็ว แรง และตำแหน่ง Singularity
 - 2.2.8 Homogeneous transformation matrix
 - 2.2.9 การบอก Position และ Orientation
 - 2.2.9.1 Euler angle
 - 2.2.9.2 Fixed angle

บทที่ 3 การจัดเตรียมกระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียรใน

- 3.1 การจัดเตรียมสถานที่
- 3.2 การเตรียมแท่นขัดกระดาษทราย

- 3.3 ตัวจับ (Gripper) และการซึ้งงานจำลองสำหรับการเจียร์ใน
- 3.4 หุ่นยนต์ Fanuc M-16iB/20
- 3.5 การสอบเที่ยบตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทราย (Calibration)

บทที่ 4 กระบวนการผลิตและการออกแบบการผลิต

- 4.1 การใช้โปรแกรม CAM ในการคำนวณหาเส้นทางการขัดชิ้นงาน
 - 4.1.1 โปรแกรม Mastercam
 - 4.1.1.1 การประยุกต์ใช้เครื่องมือกับชิ้นงานที่ทำการทดสอบ
 - 4.1.2 G-code
- 4.2 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
 - 4.2.1 Post processor
 - 4.2.1.1 หลักการทำงาน
 - 4.2.1.2 การสร้าง Homogeneous transformation matrix จาก CAM
 - 4.2.1.3 การสร้าง Homogeneous transformation matrix ของหุ่นยนต์
 - 4.2.1.4 การสร้าง Post processor
 - 4.2.2 โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และโค้ดคำสั่งของหุ่นยนต์

บทที่ 5 การทดลองกระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ใน

- 5.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่หุ่นยนต์
 - 5.1.1 การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมพลาสติก PLA (3D-printing)
 - 5.1.2 การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมเหล็ก
- 5.2 การทดสอบการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ใน
- 5.3 อภิปรายผลการทดสอบการผลิต

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

- 6.1 สรุปผลการดำเนินงาน
- 6.2 ข้อเสนอแนะ

อ้างอิง

ภาคผนวก

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ในปัจจุบันมีผู้ป่วยจำนวนมากประสับปัญหาเกี่ยวกับกระดูกสะโพกที่เสียหายจากอายุและอุบัติเหตุต่าง ๆ ก้านสะโพกเทียมจึงถูกคิดค้นเพื่อเป็นชิ้นส่วนที่นำมาปลูกค่ายให้ผู้ป่วยสำหรับที่ต้องการเปลี่ยนกระดูกทดแทนกระดูกสะโพกที่เสียหาย ซึ่งการผลิตก้านสะโพกเทียมสำหรับผู้ป่วยนั้นจะใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปในการผลิต ทำให้ก้านสะโพกเทียมมีความแข็งแรงของวัสดุสูง และไม่สามารถนำมาใช้งานในทางการแพทย์ได้ทันที นอกจากนี้ก้านสะโพกที่ผลิตจากวัสดุโคบล็อตโครเมียม (CoCr) นั้นมีความแข็งของวัสดุมาก ดังนั้นจากการผลิตในปัจจุบันที่ใช้เครื่อง CNC ในการกัดชิ้นงานจึงทำได้ยากและกินเวลานาน เนื่องจากชิ้นงานมีความซับซ้อนในการขึ้นรูปวัสดุและมีความแข็งสูงจึงอาจทำให้มีเดียวของเครื่อง CNC เสียหายได้

โครงการนี้จึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวิธีการเจียระไนผิว ก้านสะโพกเทียมโดยการนำ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเข้ามาทำหน้าที่การเจียระไน ก้านสะโพกแทนการผลิตด้วยเครื่อง CNC เพื่อลดเวลาการทำงานและลดความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้ในประเทศไทยยังไม่มีผู้ผลิตที่ทำงานลักษณะดังกล่าว โครงการนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาวิธีการใหม่ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

1.2 จุดประสงค์ในการทำวิจัย

สำหรับวัตถุประสงค์ของโครงการ ผู้จัดทำมีเป้าหมายในการพัฒนาการผลิตวิธีการเจียระไน ก้านสะโพกด้วยหุ่นยนต์ระบบอัตโนมัติให้สามารถเป็นวิธีที่ใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมปัจจุบันและเพื่อศึกษาเป็นองค์ความรู้ สำหรับต่อยอดในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ในอนาคต โดยในการทำวิจัยนี้ผู้จัดทำตั้งเป้าให้หุ่นยนต์ขัดก้านสะโพกเทียมที่หล่อจากวัสดุโคบล็อตโครเมียมให้มีพื้นผิวอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ในการผ่าตัดเปลี่ยน ก้านสะโพกและลดเวลาในการผลิต ก้านสะโพกเทียมจากวิธีเดิม (CNC) นอกจากนี้ยังมุ่งเป้าเพื่อพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานในการผลิตของชิ้นงาน ตอบสนองความต้องการของผู้ป่วยที่มีมากกว่ากำลังการผลิต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- สนใจทำวิจัยในการผลิตเนพะส่วนวิธีการเจียร์ในผ้าเท่านั้น ไม่สนใจการผลิตในส่วนการหล่อชิ้นงานโดยให้ความสำคัญกับผ้าของก้านสะโพกเทียมที่เกิดจากการเจียร์ในด้วยหุ่นยนต์เป็นหลัก
 - รูปทรงอย่างง่ายที่ใช้ทดสอบการขัดผลิตจากเหล็กเป็นวัสดุ
 - ก้านสะโพกเทียมที่ใช้ในการทดสอบผลิตจากวัสดุ Cobalt chromium เท่านั้น
 - ความแม่นยำของขนาดก้านสะโพกเทียมสามารถคลาดเคลื่อนได้ ไม่เป็นนัยสำคัญ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

๘	ทดสอบการเจียร์ไนกับก้านสะโพก เที่ยม									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถคิดค้นโปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์ที่ประยุกต์จากโปรแกรมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมปัจจุบันผ่านขั้นตอนและอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางที่กำหนดและเจียร์ในชิ้นงานที่ทำการทดสอบไปได้จริง นอกจากนี้หากโครงงานสำเร็จก็สามารถนำวิธีการผลิตด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ในไปต่อยอดในการผลิตก้านสะโพกเทียมในอุตสาหกรรมในชีวิตจริง โดยการเจียร์ในนี้สามารถทำให้ก้านสะโพกเทียมที่ขัดผิดด้วยหุ่นยนต์ มีพื้นผิวที่เรียบเพียงพอ กับความต้องการในการปลูกถ่ายทางการแพทย์ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการผลิตและทำให้ระบบการผลิตเป็นอัตโนมัติมากกว่าปัจจุบัน

บทที่ 2 ปริทรรศ์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review and Theory)

2.1 ปริทรรศ์วรรณกรรม

2.1.1 ก้านสะโพกเทียมในปัจจุบัน

การเปลี่ยนสะโพกเป็นหนึ่งในความสำเร็จที่ยิ่งใหญ่ที่สุดของศัตวรรษที่ผ่านมาในด้านการผ่าตัดนับตั้งแต่การดำเนินการครั้งแรกในปี 1960 มีการสำรวจการออกแบบและการตัดแปลงวัสดุจำนวนมากเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้นตอนการเปลี่ยนสะโพกและประสิทธิภาพ เนื่องจากอาการบาดเจ็บที่สะโพกนั้นเกิดขึ้นได้บ่อยกว่าการบาดเจ็บที่ข้อต่ออื่น ๆ ในระหว่างการพัฒนา ก้านสะโพกเทียมได้มีการปรับปรุงวัสดุการผลิตต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงโลหะผสม cobalt chrome มีเที่ยม, โลหะผสมไททาเนียมเหล็กกล้าไร้สนิม และวัสดุอื่น ๆ ซึ่งทั้งหมดเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์

ไททาเนียมอัลลอยด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายบางชนิด เช่น Ti-6Al-4V มีไททาเนียมเกือบ 90% อลูมิเนียม 6% และวานเดียม 4% ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมและวานเดียมเป็นปัญหาสำคัญสำหรับศัลยแพทย์กระดูกและข้อมาโดยตลอด เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการปล่อยวานเดียมและอะลูมิเนียมไออกอนในระหว่างการละลายของโลหะผสมสามารถส่งเสริมการเปลี่ยนสีของเนื้อเยื่อรอบข้าง และอาจทำให้เกิดการอักเสบภายในร่างกาย

นอกจากโลหะแล้วเซรามิกเช่นอลูมินาและเซอร์โคเนียยังถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในขาเทียมที่กระดูกตันขาและเยื่อบุ มีรายงานว่าอัตราการสึกหรอของอลูมินา้นนั้นต่ำกว่าโลหะบนพื้นผิวเดียวกันถึง 20 เท่า นอกจากนี้โมดูลัสสีดหุ่นของโลหะผสม Co-Cr-Mo และอลูมินา มีค่าประมาณ 10 และ 19 เท่าของกระดูก cortical เทกซ์ตามลำดับ



รูปที่ 1 ก้านสะโพกเทียมจากเซรามิก



รูปที่ 2 ก้านสะโพกเทียมไททาเนียมอัลลอยด์



รูปที่ 3 ก้านสะโพกเทียมโคบล์โครเมียม

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 CAM

CAM (Computer Aided Manufacturing) คือการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผลิต เป็นการจำลอง การสร้างเส้นทางการกินพื้นผิวของ Cutting tool ที่จะค่อยๆ กัดชิ้นงาน และสามารถสร้างโค้ดการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์กัดชิ้นงานในรูปแบบ G-Code ทั้งนี้ CAM ต้องอาศัยข้อมูลรูปปั้งจาก CAD

2.2.2 CAD

CAD (Computer Aided Design) คือการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบ โดยใช้ในการสร้าง ชิ้นส่วนด้วยพื้นฐานแบบจำลองเรขาคณิต และใช้สร้างแบบจำลองเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ แก้ไข ก่อนจะผลิตออกมา เป็นขึ้นจริง CAD ยังสามารถใช้งานคู่ไปกับ CAM ได้โดย CAD จะเป็นวัตถุในการจำลองกระบวนการใน CAM

2.2.3 CNC

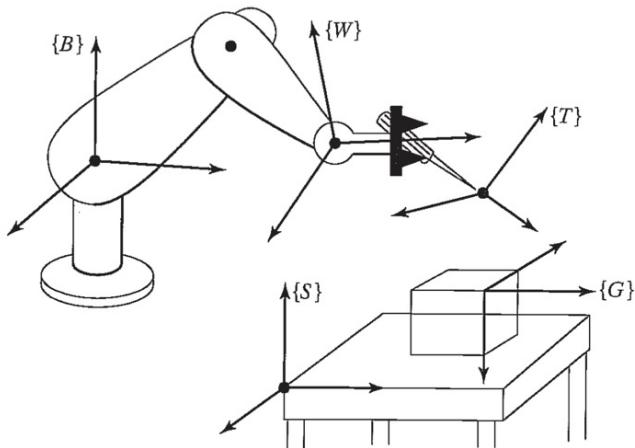
CNC (Computer Numerical Control) คือ การควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์เป็นการใช้ คอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมเครื่องจักรต่างๆ เช่นเครื่องกลึง เครื่องกัด โดยใช้(รูปแบบคำสั่งของ G-Code ซึ่งจะมี ลักษณะแตกต่างกันในแต่ละตัวเครื่อง เครื่องCNC ในปัจจุบันมีหลายชนิดได้แก่ แบบ 3 แกน 4 แกน และ 5 แกน ซึ่งจะต่างกันที่องศาสตร์ และความแม่นยำของเครื่อง

2.2.4 หลักการทำงานของแขนหุ้นยนต์

แขนกลประกอบด้วยท่อนแขน (Link) ที่นำมาเชื่อมต่อกันโดยไอล์ตั้งแต่ฐานของหุ้นยนต์ ไปจนถึงปลายแขน ซึ่งนำมาเชื่อมต่อกันโดยข้อต่อ (Joint) ซึ่งจำนวนท่อนแขนของหุ้นยนต์จะแตกต่างกันออกไปในโครงงานนี้ได้

ใช้หุ่นยนต์ 6 แขน สำหรับข้อต่อของหุ่นยนต์จะมีอยู่ 2 แบบ คือข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) และข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) ทั้งสองมีจำนวนของศาสเรีท่ากันคือ 1

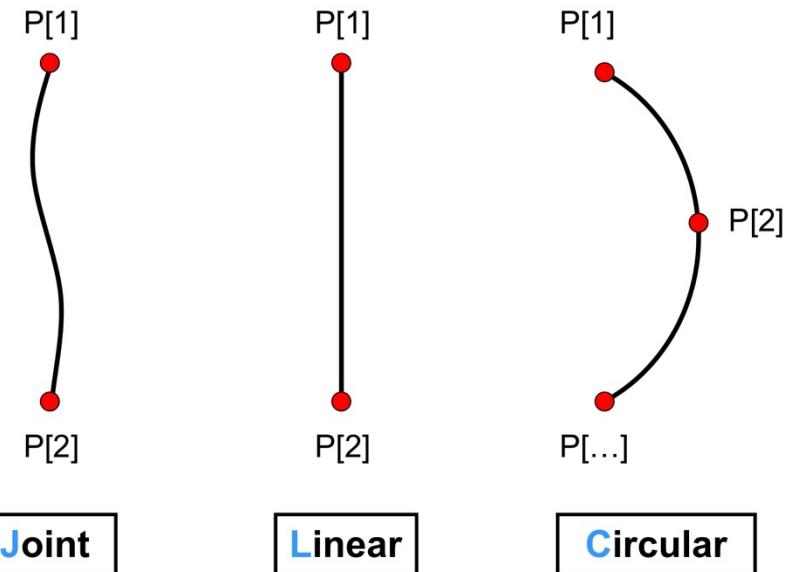
ในการทำงานของแขนหุ่นยนต์ ต้องพิจารณาทำແນ່ງຂອງວັດຖຸຕ່າງໆ ในระบบແກນສາມມືດີ ເຊັ່ນຕົວແນ່ນ
หุ่ນยนต์ເອງ ຂຶ້ນງານທີ່ນຳມາຕິດຕຽບພລາຍແນ່ນຂອງຫຸ່ນຍນຕ ແລະວັດຖຸນໍາໃໝ່ຢູ່ກັບປະເທດງານ ໂດຍການພິຈາຮານນັ້ນ
ເຮົາຈະນຳແກນສາມມືດີ ຮົ້ວໂກນອ້າງອີງໄປຕິດກັບວັດຖຸ ແລະຫຸ່ນຍນຕດັ່ງຮູບ 4 ຜຶ້ງຕົວແປຣທີ່ຈຳເປັນຕົວອະນຸມີ 2 ອຍ່າງ
ຕຳແນ່ນ ແລະທີ່ສາທາງ



ຮູບທີ່ 4 ແກນອ້າງອີງແລະແກນສາມມືດີທີ່ຕິດບັນແນ່ນຫຸ່ນຍນຕ ແລະວັດຖຸ

2.2.4.1 ປະເທດການເຄີ່ອນທີ່ຂອງຫຸ່ນຍນຕ

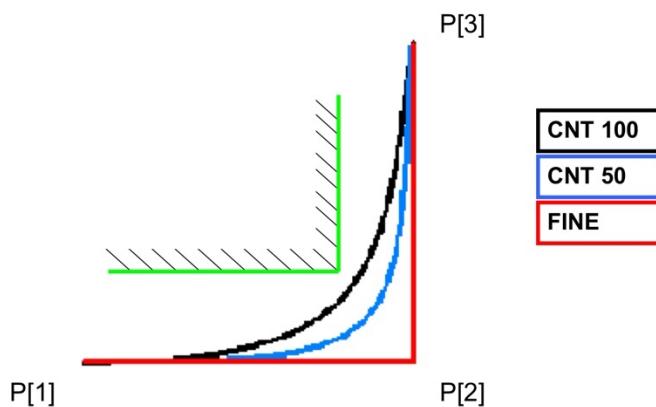
ການເຄີ່ອນທີ່ຂອງຫຸ່ນຍນຕໂດຍຈະອ້າງອີງຈາກຫຸ່ນຍນຕທີ່ໃໝ່ໃນໂຄຮງຈານນີ້ ຈະມີອູ່ດ້ວຍກັນສາມແບບໜັກ
ກີ່ອ 1. Joint move ຜຶ້ງຈະເປັນການເຄີ່ອນທີ່ຈາກຈຸດໜຶ່ງໄປຢັງອຶກຈຸດໜຶ່ງໂດຍໄມ່ສັນໃຈວ່າທີ່ສາທາງການເຄີ່ອນຈະເປັນ
ອຍ່າງໄຣ ການເຄີ່ອນນີ້ແບບນີ້ຈະມີຂໍ້ຈຳກັດນ້ອຍທີ່ສຸດ ແລະມັກຄູກໃໝ່ໃນການເຮີ່ມຕົ້ນຂອງໂປຣເຈັກຜຶ້ງເພື່ອໃຫ້ຂໍ້ຈຳກັດການ
ເຄີ່ອນທີ່ໃນກຣນີທີ່ຕຳແນ່ນທ່າງກັນມາກ ແລະໃໝ່ໜີກີ່ເລີ່ຍ Singularity ດັ່ງ 2. Linear move ກີ່ອ ການເຄີ່ອນທີ່ຈາກຕຳ
ແນ່ນທີ່ໄປຢັງອຶກຕຳແນ່ນທີ່ເປັນເສັ້ນຕຽງ ຜຶ້ງມີຂໍ້ຈຳກັດມາກກວ່າ Joint move 3. Circular move ກີ່ອ ການເຄີ່ອນທີ່ເປັນວົງຄລມໂດຍໃໝ່ເພີ່ຍ 2 ຈຸດ ແລະຫຸ່ນຍນຕຈະສ້າງວິດີໂດຍອັຕໂນມັຕີ ທັ້ງ 3 ຮູບແບບການເຄີ່ອນທີ່ຈະແສດງ
ໄດ້ດັ່ງຮູບທີ່ 5



รูปที่ 5 ภาพประเภทการเคลื่อนที่หุ่นยนต์

2.2.4.2 เส้นวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Moving statement)

เส้นวิถีการเคลื่อนที่ สามารถปรับตั้งความต่อเนื่องในการเคลื่อนที่ได้ โดยจะมี 2 พังชักหลัก คือ FINE และ CNT (Continuous) โดยในการเคลื่อนที่แบบ FINE จะไปการเคลื่อนที่ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากจะเป็นการเคลื่อนไปหยุดที่จุดๆ นึงก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังจุดต่อไป ในขณะที่แบบ CNT เป็นการเคลื่อนที่ที่มีความต่อเนื่องมากกว่าแบบ FINE เนื่องจากจะไม่ไปสัมผัสถูกดเป้าหมายโดยตรงแต่จะเข้าใกล้เท่านั้น โดย CNT สามารถเลือกระดับความโค้งได้ตั้งแต่ 0-100 ระดับ แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ 2 แบบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพเปรียบเส้นวิถีเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในค่า CNT ต่างๆ

2.2.5 จลศาสตร์ตรงของแขนกล (Forward kinematic of manipulator)

ในการแก้ปัญหาเพื่อหาตำแหน่งต่างๆ ของปลายแขนกลนั้น วิธีการที่ง่ายและเป็นที่นิยมคือการทำ Forward kinematic เป็นการคำนวณกัดและทิศทางของแกนที่ติดกับปลายแขนเทียบกับแกนที่ติดกับฐานแขนกล การทำ Forward kinematic นี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นการแปลงค่าจากขององศาการหมุนของข้อต่อ (Joint space) ไปเป็นตำแหน่งในแกนสามมิติ (Catesian space) สำหรับหุ่นยนต์ 6 แขนก الرحمن Forward kinematic จะอาศัยหลักการแบบ Denavit hartenberg

2.2.5.1 Denavit hartenberg

สำหรับแขนหุ่นยนต์การจะสร้าง Homogeneous transformation matrix จะอาศัยตัวแปรแบบ Denavit hartenberg ซึ่งจะประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรได้แก่ 1. Link length (a_i) คือระยะห่างระหว่าง Z_{i-1} และ Z_i ตามแนวแกน x_i 2. Link twist (α_i) คือองศาจากแกน Z_{i-1} ไปถึง Z_i รอบแกน x_i 3. Link offset (d_i) คือระยะห่างจากตำแหน่ง origin ของแกนอังอิ้ง $i-1$ ไปถึง x_i ตามแนวแกน Z_{i-1} 4. Joint angle (θ_i) คือองศาสระหว่างแกน x_{i-1} และ x_i รอบแกน Z_{i-1} เมื่อทำการหาตัวแปรทั้ง 4 ตัวของข้อต่อหุ่นยนต์ได้ จากนั้นเราจะนำค่าเหล่านี้มาใส่ในสมการด้านล่าง เพียงเท่านี้ก็จะได้ Transformation matrix ของข้อต่อหนึ่งไปยังอีกข้อต่อหนึ่งของหุ่นยนต์ได้

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.6 จลศาสตร์ผกผันของแขนกล (Inverse kinematic of manipulator)

ในการทำงานของแขนกลนั้น มักจะสนใจที่ตำแหน่งปLANAของแขนหุ่นยนต์เพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งการเคลื่อนไปยังตำแหน่งใดๆ ตามนั้น ต้องทราบค่าองศาของข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้ Inverse kinematics ในกระบวนการ ซึ่งมีความยากกว่า Forward kinematic เนื่องจากเป็นสมการเป็นแบบ Non-linear ซึ่งหนึ่งสมการอาจได้หลายคำตอบ หรือไม่มีคำตอบเลย ในปัจจุบัน แขนกลจะมีสมการเหล่านี้ติดตั้งอยู่ในแขนหุ่นยนต์อยู่แล้ว ทำให้ผู้ใช้มิจำเป็นต้องหาสมการ Inverse kinematic เอง

2.2.7 ความรื้ว แรง และตำแหน่ง Singularity

ในการจัด การตำแหน่งปลายแขนของแขนกล มัก ต้องพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล ด้วยเพื่อไม่ให้แขนกลกระแทกอุปกรณ์หรือเคลื่อนที่เร็วเกินไป ในการทำงานของแขนกลจะมีบางตำแหน่ง ที่ทำให่องศาเรื่องแขนหุ่นยนต์ลดลงหรือทำให้ท่อนแขนบางท่อนเคลื่อนที่เร็วเกินไป จุดนี้ เรียกว่าจุด Singularity ซึ่งเกิดขึ้นในการทำงานของแขนกลทุกชนิด

นอกจากการควบคุม ตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์แล้ว แขนกลมักถูก ใช้ในการจับสิ่งของหรืองานอื่นๆ ที่ต้องออกแบบที่ปลายแขน แรงที่ปลายแขนนี้เกิดขึ้น จากแรงบิดของข้อต่อต่างๆ ส่งมาอย่างปลายแขน สามารถคำนวณได้โดยใช้ Jacobian matrix ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของข้อต่อและ ความเร็วในระบบสามมิติ

2.2.8 Homogeneous transformation matrix

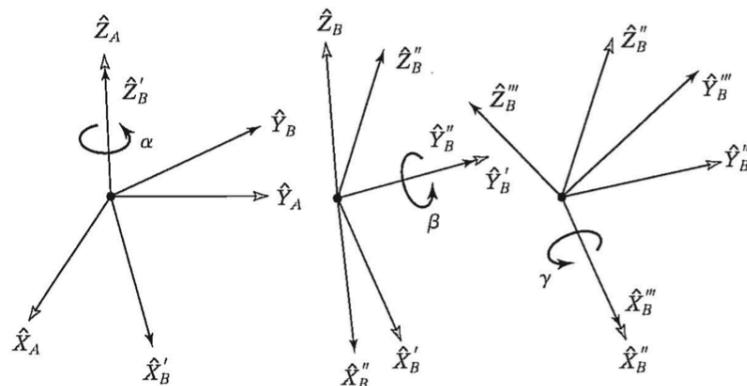
Homogeneous transformation matrix คือ matrix ที่มีไว้เพื่อรับ ตำแหน่งและทิศทางของแกนของทั้งหุ่นยนต์ และแกนของเครื่อง CNC Homogeneous transformation matrix มีความสำคัญอย่างในงานที่ใช้แขนหุ่นยนต์ เนื่องจากตำแหน่งและทิศทางอยู่ในรูปแบบของ Matrix จึงสามารถคูณกับ Matrix อื่นๆ ได้ เพื่อจะสามารถรู้ตำแหน่ง และทิศทางของแกนอ้างอิงหนึ่งไปยังอีกแกนอ้างอิงหนึ่ง ซึ่งในโปรเจคนี้จะใช้ Homogeneous transformation matrix อุ่นมากในการสร้าง Post processor ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ Post processor

2.2.9 การบอก Position และ Orientation

ในทางหุ่นยนต์จะใช้ Transformation matrix ในภาระบุต้าแห่งและทิศทางของแกน ทั้งนี้ ลำดับการคูณของ Matrix มีผล หากลำดับการคูณ transformation Matrix ผิดลำดับจะทำให้ Matrix ผิดและได้ตำแหน่งและทิศทางไม่ตรงกับความเป็นจริง ทั้งนี้ ลำดับการคูณ Matrix แต่เครื่อง CNC และแขนของหุ่นยนต์จะแตกต่างกันไปซึ่งไม่ตายตัว แต่จะสามารถหาได้โดยวิธีพิสูจน์จากตำแหน่งที่รู้ ซึ่งจะกล่าวในบท 4.2 Post processor ใน การบอกลำดับการคูณ Matrix จะมีอยู่สองแบบหลักๆ คือ Euler angle และ Fixed angle อีกทั้งยังมารูปแบบอื่นอีกแต่จะไม่ลงรายละเอียดในโครงการนี้

2.2.9.1 Euler angle

Euler angle จะเป็นเลื่อนหรือหมุนแกนจากแกนที่ย้ายมาก่อนหน้ายกตัวอย่างดังรูปที่ QQ และลำดับการคูณของ Matrix จะเป็นดังรูปที่ 7



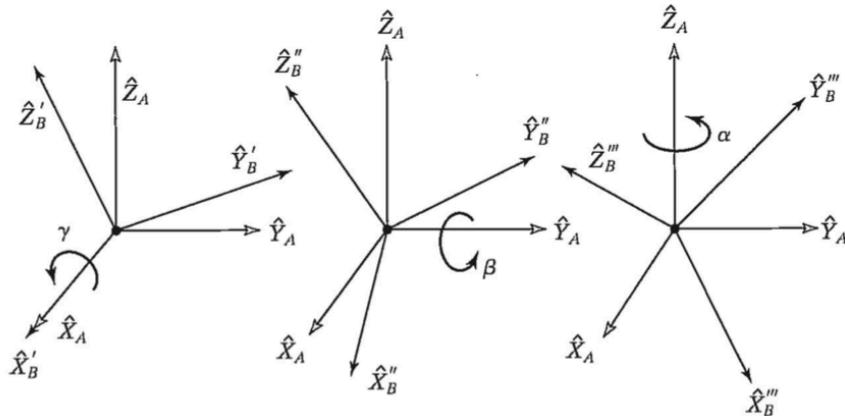
รูปที่ 7 ตัวอย่างแสดงการหมุนแบบ Euler angle

$$\begin{aligned}
 {}_B^A R_{Z'Y'X'} &= R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 7 ตัวอย่างแสดงการหมุนของ Transformation matrix แบบ Euler angle

2.2.9.2 Fixed angle

สำหรับ Fixed Angle จะแตกต่างกับ Euler angle ตรงที่ Fixed angle จะเป็นการเทียบกับแกนตั้งต้นแรก ไม่ได้เทียบกับแกนที่ถูกย้ายมาเหมือน Euler angle ซึ่งยกตัวอย่างดังรูปที่ 8 แกน Z-A ของ Matrix เป็นดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างการหมุนแบบ Fixed angle

$$\begin{aligned}
 {}_B^A R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) &= R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 9 ลำดับการคูณของ Transformation matrix แบบ Fixed angle

บทที่ 3 การเตรียมตัวก่อนออกแบบ (Conceptual design)

3.1 การจัดเตรียมสถานที่

สถานที่ที่จะใช้ผลิตก้านสะโพกเทียมโดยแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม คือห้อง 906 ชั้น 9 อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) โดยสาเหตุที่ต้องทำการผลิตภายในห้องนี้เนื่องจากห้องดังกล่าวมีการติดตั้งแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมไว้แล้ว ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ และเงื่อนไขของเรามีต้องป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองที่มาจากการผลิตเนื่องจากห้องดังกล่าวเป็นห้องทำงานซึ่งมีผู้อื่นร่วมกันใช้ห้องด้วย ดังนั้นเราจึงนำเต็นท์มาคลุมแขนหุ่นยนต์และแท่นขัดกระดาษทราย และนำแผ่นพลาสติกมาปิดกันเพื่อป้องกันการกระจายของฝุ่นจากการผลิต



รูปที่ 10.1 แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ณ ห้อง 906 อาคารเจริญวิศวกรรม



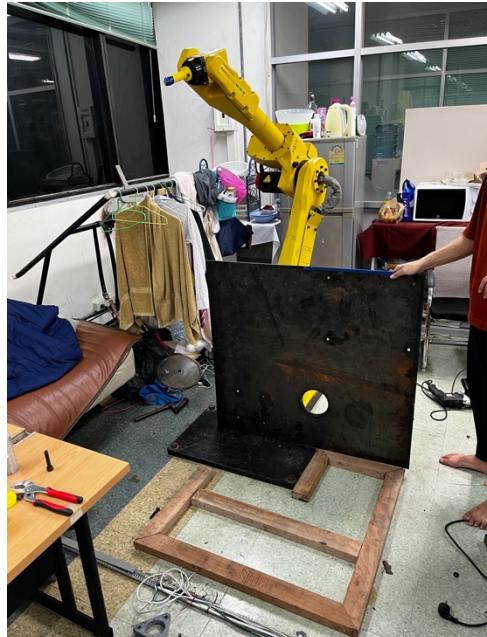
รูปที่ 10.2 แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ณ ห้อง 906 อาคารเจริญวิศวกรรม

3.2 การจัดเตรียมแท่นขัดกระดาษทราย

แท่นขัดกระดาษทรายที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยวิธีการเจียร์ในคือแท่นขัดของยี่ห้อ Creusen รุ่น BSS 8200 มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 800 วัตต์ มีความเร็วอยู่ที่ 2800-3400 รอบต่อนาที และใช้สายพานขนาด 1000 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร

เบื้องต้นได้ดัดแปลงเครื่องขัดกระดาษทรายโดยการถอดฝาครอบแท่นขัดกระดาษทราย เพื่อถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็นกับกระบวนการผลิตออก และสายพานที่เลือกใช้คือเบอร์ 40 80 และ 120 เนื่องจากขนาดสายพานขนาดมาตรฐานที่หาซื้อได้เป็นขนาด 4 นิ้ว x 36 นิ้ว ดังนั้นทางผู้จัดได้ทำการตัดแปลงโดยการขยับมูเลร์เข้ามาเพื่อให้สายพานขนาดมาตรฐานได้

นอกจากทางเราได้นำแผ่นเหล็กขนาด 1 เมตร x 1 เมตร หนา 5 มิลลิเมตร เพื่อยืดฐานแท่นขัดกระดาษทรายกับฐานของหุ่นยนต์เพื่อให้แท่นมีความแข็งเกร็งและป้องกันความคลาดเคลื่อนในขณะที่เจียร์ในชิ้นงาน

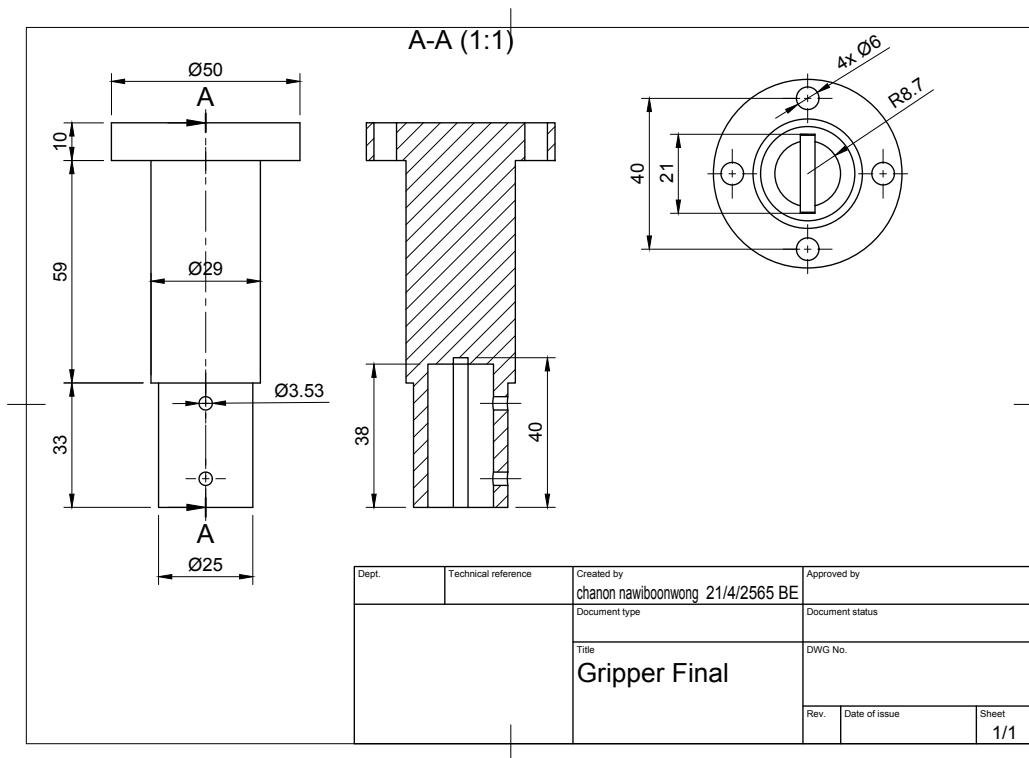


รูปที่ 11 ภาพแท่นขัดกระดาษทรายเมื่อติดตั้งแล้ว(ซ้าย) และภาพฐานรองแท่นขัดกระดาษทรายก่อนติดตั้ง(ขวา)

3.3 ตัวจับ (Gripper) และชิ้นงานสำหรับทดลองการเจียระไน

ตัวจับคืออุปกรณ์ที่จับก้านสะโพกเทียมให้ติดกับแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการออกแบบตัวจับ จำเป็นต้องให้มีความแข็งแรงดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้ คือ สแตนเลส นอกจากนี้การออกแบบตัวจับควรออกแบบให้มีชับช้อน เพื่อความง่ายในการผลิตชิ้นงาน

ในการผลิตตัวจับนั้นจะนำเพลาสแตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร มากลึงให้เป็นสเต็ปตามที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนต่อมาคือใช้เครื่องกลึงเจาะรูที่ปลายเพื่อให้ได้รูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ลึก 38 มิลลิเมตร และเจาะรูที่เป็นด้วยเครื่องกัดโดยใช้ดอกสว่านขนาด 6 มิลลิเมตร สำหรับร้อยน็อตขนาด M6 เมื่อเสร็จ ขั้นตอนเบื้องต้นแล้วเราจะเจาะรูที่ปลายอีกสองรูในแนวตั้งโดยใช้ดอกสว่านขนาด 4 มิลลิเมตร สำหรับใส่ set screw ขนาด M4 เพื่อยึดก้านสะโพกเทียมกับตัวจับ



รูปที่ 12 ภาพ Drawing ของชิ้นก้านสะโพกเทียม



รูปที่ 13 ตัวจับก้านลงทะเบกเที่ยมสแตนเลสที่ผลิตด้วยการกลึง

นอกจากนี้ก่อนการขัดก้านลงทะเบกเที่ยมเราจำเป็นต้องขัดรูปทรงสี่เหลี่ยมอย่างง่ายเพื่อคุณลักษณะเบื้องต้นจากการผลิตชิ้นงาน โดยขนาดที่ออกแบบไว้คือ $30 \times 40 \times 70$ มิลลิเมตร เนื่องจากตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทรายนั้นยังไม่ถูกต้อง โดยชิ้นงานที่นำมาขัดจะมาจากพลาสติก PLA และผลิตจากเครื่อง 3D-Printer เพื่อถูกภาพรวมในการขัด เมื่อปรับแก้ตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทรายให้ถูกต้องแล้วขั้นตอนต่อมาทางเราได้ทำการผลิตชิ้นงานรูปทรงอย่างง่ายที่ทำมาจากเหล็กเพื่อคุณลักษณะของการขัดวัสดุที่มีความแข็งไกร้าวเดียงกับก้านลงทะเบกเที่ยม



รูปที่ 14 ภาพทรงสี่เหลี่ยมอย่างง่ายสำหรับการทดสอบจากวัสดุพลาสติก PLA(ซ้าย)และเหล็ก(ขวา)

3.4 หุ่นยนต์ Fanuc M-16iB/20

หุ่นยนต์ Fanuc เป็นหุ่นยนต์ที่ 6 Degree of freedom ก่อนเริ่มต้นการใช้งานหรือก่อนนำโปรแกรมเข้าหุ่นยนต์จำเป็นต้องตั้งตำแหน่ง 0 องศา สำหรับทุกแกนของหุ่นยนต์ก่อน เนื่องจากหุ่นยนต์เมื่อผ่านการใช้งานตำแหน่งจะคลาดเคลื่อน ตำแหน่ง 0 องศาจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้หุ่นยนต์ไม่เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ ในหุ่นยนต์บางรุ่นจะมีฟังก์ชันตั้งค่า 0 องศาซึ่งเป็นค่าจากโรงงานได้ แต่หากไม่มีฟังก์ชันนี้การแก้ไขเบื้องต้นคือการตั้งตำแหน่ง 0 องศาโดยคาดคะเนจาก Eyemarker ที่ติดอยู่ตามหุ่นยนต์ โดย eyemarker จะมีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง และนอกเหนือจากนี้ผู้จัดทำยังได้ใช้มาตรฐานน้ำเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตั้งตำแหน่ง 0 องศาของหุ่นยนต์

สำหรับขั้นตอนการตั้งค่า 0 องศานั้นเริ่มจากขับแกนหุ่นยนต์โดยใช้ Joint mode เคลื่อนให้ Eyemarker ของแต่ละแกนตรงกันโดยคาดคะเนจากสายตา สำหรับบางแกนสามารถใช้มาตรฐานน้ำเข้ามาช่วยได้เพื่อเพิ่มความแม่นยำ แสดงดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 15 การใช้มาตรฐานน้ำในการตั้งค่า 0 องศา



รูปที่ 16 การตั้งค่า 0 องศาโดยใช้ eyemarker ตามหุ่นยนต์

สำหรับแกนปลายแขนของหุ่นยนต์ หรือแกนที่ 6 ของหุ่นยนต์ จะมีความพิเศษกว่าแกนอื่นๆ ของหุ่นยนต์ เนื่องจากไม่มี eyemarker ซึ่งสามารถตั้งได้ตามความเหมาะสมของขั้นงานที่ได้ออกแบบไว้แทน แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การตั้งค่า 0 องศาที่แกนปลายแขน

เมื่อได้ตำแหน่งที่ทุกแกนอยู่ในตำแหน่งที่ทุกแกนใกล้เคียงตำแหน่ง 0 องศา แสดงดังรูปที่ 18 ทำการบันทึกตำแหน่งที่ได้เป็น 0 โดย function Zero Position Mastering บน Teach pendant



รูปที่ 18 ภาพรวมที่ทุกแกนเป็น 0 องศา

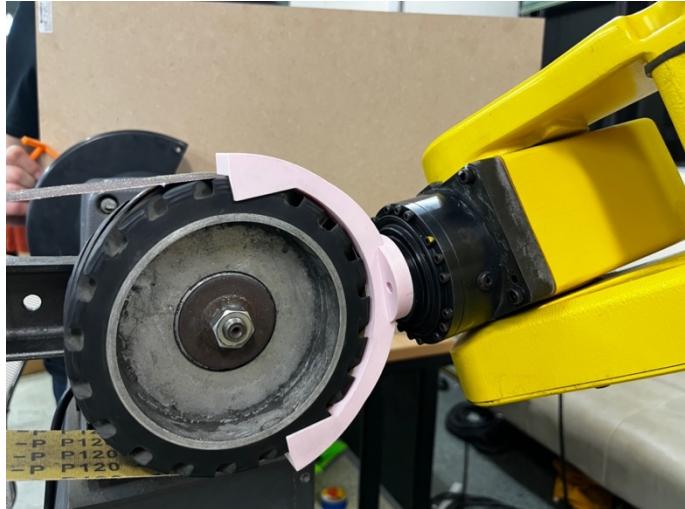
3.5 การสอบเทียบตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทราย (Calibration)

โครงการนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วีริเจียร์ในนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งของการเจียร์ในของหุ่นยนต์เป็นอันดับแรกเนื่องจากความคาดเคลื่อนในตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทรายส่งผลถึงตำแหน่งจุดที่สัมผัสระหว่างการเจียร์ในไปจนถึงความคาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน ดังนั้น ก่อนทำการเจียร์ในก้านสะโพกเทียมกับแท่นขัดกระดาษทรายจึงจำเป็นต้องทดสอบความถูกต้องของแท่นขัดกระดาษทรายที่จะทำการเจียร์ในกับหุ่นยนต์จริงให้มีตำแหน่งและขนาดรูปร่างตรงกับในโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่เพื่อให้แน่ใจว่าเส้นทางจำลองที่คำนวนจากโปรแกรมสามารถทำงานได้จริงกับแท่นขัดจริงเสมือนในโปรแกรมทุกประการ อีกทั้งการสอบเทียบยังช่วยลดอันตรายที่เกิดกับผู้ใช้งานหุ่นยนต์เนื่องจากช่วยลดการประทุของหุ่นยนต์กับสิ่งกีดขวางอื่นก่อนจะเริ่มทำการทดลองหากมีสภาพแวดล้อมไม่ตรงกับในโปรแกรมจำลอง



รูปที่ 19 ภาพการสอบเทียบกับตำแหน่งบนแท่นขัดกระดาษทราย

สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบนั้นผู้จัดทำได้สร้างโครงสร้างไว้ติดกับปลายแขนหุ่นยนต์ซึ่งหน้าที่ในการซึ่งระบุตำแหน่งของแท่นขัดกระดาษทรายจริงในจุดอ้างอิงต่างๆ เพื่อเก็บค่าตำแหน่งและการวางแผนตัวของหุ่นยนต์เทียบกับโปรแกรมปลายแขนของโตรลเลอร์ควบคุมหุ่นยนต์ (Teach pendant) ก่อนนำค่าที่ได้จากการจุดต่างๆ ไปใส่ในโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่หุ่นยนต์เพื่อกำหนดตำแหน่งและการวางแผนตัวแท่นขัดกระดาษทรายในโปรแกรมได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 20 ภาพการใช้งานโปรแกรมปลายแหลม(ซ้าย) และ โปรแกรมครึ่งทรงกลม(ขวา)

โปรแกรมที่ใช้งานในการสอดบเทียบด้วยหุ่นยนต์ที่ผู้จัดทำออกแบบมา มีสองรูปแบบได้แก่ โปรแกรมที่มีลักษณะคล้ายปากกาปลายแหลมไว้ชี้จุดตำแหน่งอ้างอิงต่างๆ ของแท่นขัดกระดาษทราย และ โปรแกรมที่มีลักษณะครึ่งทรงกลมไว้ประกอบติดกับล้อสายพานเพื่อวัดค่าความแม่นยำ ลักษณะนี้มีความโค้งบริเวณล้อสายพานซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้เปลี่ยนงาน

บทที่ 4 กระบวนการผลิตและการออกแบบการผลิต (Manufacturing Process)

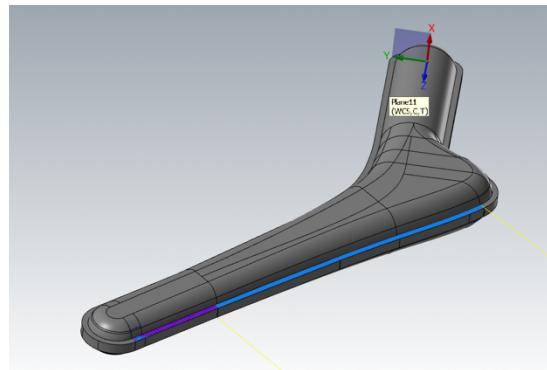
4.1 การใช้โปรแกรม CAM ในการคำนวณหาเส้นทางการขัดชิ้นงาน

สำหรับวิธีการผลิตก้านสหโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิริเจียร์ในนั้น ในการเจียร์ในพิวของชิ้นงานจำเป็นจะต้องออกแบบและสร้างเส้นทางการขัดชิ้นงานเพื่อส่งข้อมูลไปยังหุ่นยนต์สำหรับการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ผู้จัดทำจึงได้ดำเนินการสร้างเส้นทางการเจียร์ในชิ้นงานโดยใช้พื้นฐานจากการทำงานของโปรแกรม CAM (Computer aided manufacturing) ใน การคำนวณและออกแบบเส้นทางการขัดโดยอ้างอิงจากการใช้การทำงานของเครื่อง CNC ในกระบวนการกัด (milling) ด้วยมีดกัดชิ้นงาน หลักการทำงานของเครื่อง CNC นั้นใช้วิธีการหลัจจบัชิ้นงานให้อยู่ในแล้วมีดกัดเคลื่อนที่เข้ากัดชิ้นงานตามโปรแกรมคำสั่ง ซึ่งจะเกิดจากตัวแปลงข้อมูล (post-processor) ที่เป็นเครื่องมือเฉพาะของแต่ละเครื่อง CNC ทำหน้าที่คำนวณคำสั่งการทำงานจากโปรแกรมให้กับเครื่อง CNC อกมาในรูปแบบ G-code ซึ่งมีลักษณะเป็นโค้ดระบุตำแหน่งและองศาการวางตัวของมีดกัดชิ้นงาน ในแต่ละบรรทัดการทำงานเทียบกับแกนอ้างอิงที่จากโปรแกรม

ผู้จัดทำได้เห็นถึงประโยชน์ของโปรแกรม CAM ใน การออกแบบเส้นทางการเจียร์ในชิ้นงาน และ G-code ใน การระบุตำแหน่ง อ้างอิงของมีดกัดชิ้นงาน ผู้จัดทำจึงได้นำองค์ความรู้เกี่ยวกับ homogeneous transformation มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้าง post processor ใน การแปลงคำสั่งให้กับหุ่นยนต์ โดยใช้หลักการสมมุติให้แทนกระดาษรายที่อยู่ในทดแทนมีดกัดชิ้นงานและชิ้นงานที่ถูกจับด้วยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เข้าหากัน มีดกัด ดังนั้น การใช้โปรแกรม CAM เพื่อหา G-code ก็เปรียบเสมือนการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนสำคัญในการทำโครงการนี้

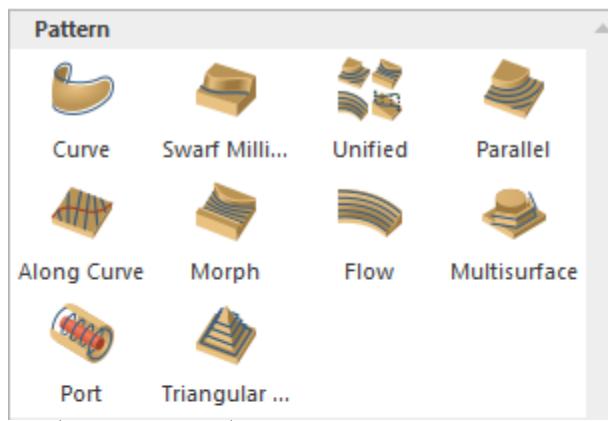
4.1.1 โปรแกรม Mastercam

ในส่วนของโปรแกรม CAM ที่ผู้จัดทำใช้ในการออกแบบเส้นทางการเจียร์ในสำหรับโครงงานนี้ คือ โปรแกรม Mastercam 2022 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานร่วมกับเครื่อง Mazak intregrex100 ที่มีอยู่ในห้องทดลอง ของมหาวิทยาลัยได้ สำหรับการทำงานของโปรแกรม CAM นั้น ก่อนที่จะใช้งานเครื่องมือในโปรแกรมสำหรับกัดชิ้นงานจำเป็นจะต้องเลือกตำแหน่งแกนอ้างอิงสำหรับเครื่อง CNC ผู้จัดทำได้เลือกตำแหน่งแกนอ้างอิงให้อยู่บนชิ้นงานในตำแหน่งเดียวกับที่ติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์ให้แกน Z พุ่งเข้าหาชิ้นงาน ทั้งกับปุ่มสีเหลืองและชิ้นงาน ก้านสหโพกเทียม โดยตั้งแกนให้เปรียบเสมือนแกนอ้างอิงที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (End-effector) เพื่อให้สะดวกต่อ การคำนวณแกนอ้างอิงในขั้นตอนต่อๆไป



รูปที่ 21 ภาพตัวอย่างการตั้งแกนอ้างอิงบนชิ้นงานในโปรแกรม Mastercam

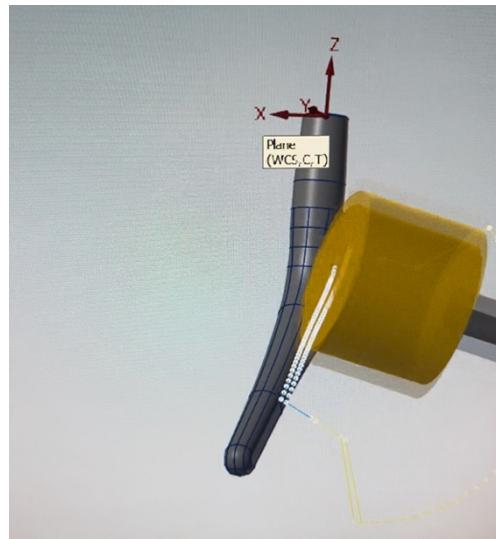
สำหรับเครื่องมือที่เลือกใช้ในโปรแกรม Mastercam 2022 จะใช้เครื่องมือจากกระบวนการกัด (milling) ควบคู่กับ post-processor ของเครื่อง CNC ที่เป็นแบบ 5-axis control ในการสร้างคำสั่ง G-code โดยผู้จัดทำได้ทดลองใช้สองเครื่องมือในการออกแบบเส้นทางการเจียระไนชิ้นงาน ได้แก่ Swarf milling และ Multisurface milling



รูปที่ 22 ภาพตัวเลือกเครื่องมือสำหรับใช้งานกับ 5-axis control CNC

- Swarf Milling

เครื่องมือในกระบวนการการกัดของเครื่อง CNC รูปแบบ multiaxis ที่มีลักษณะการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของมีดกัดให้กัดชิ้นงานด้วยด้านข้างของใบมีด ผู้จัดทำได้เลือกใช้วิธีนี้ในการทดลองออกแบบเนื่องจากต้องการจำลองให้มีดกัดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและรัศมีความโค้งเท่ากับลักษณะของแท่นขัดกระดาษทรายโดยใช้ด้านข้างหรือสันของมีดกัดให้เปรียบเสมือนตัวสายพานที่วิ่งอยู่บนล้อเพื่อเจียร์ใน



รูปที่ 23 ภาพโปรแกรมจำลองการกัดชิ้นงานด้วยวิธี Swarf milling

อย่างไรก็ตาม เมื่อผู้จัดทำได้ทดลองออกแบบเส้นทางการขัดด้วยวิธีนี้แล้ว ได้พบข้อเสียและจุดอ่อนหลายอย่างคือ ในเครื่องมือ swarf milling ไม่สามารถระบุความลึกในการกัดแต่ละครั้งได้อย่างแม่นยำ เครื่องมือไม่สามารถระบุตำแหน่งของจุดที่ทำการกัดชิ้นงานด้วยด้านข้างของใบมีดได้เป็นจุดเดียว โปรแกรมไม่สามารถควบคุมให้ด้านข้างของใบมีดกัดพื้นผิวที่มีความโค้งในหลายทิศทางได้ นอกจากนี้ เนื่องจากการจำลองให้ใบมีดมีขนาดเท่ากับลักษณะของแท่นขัดกระดาษทรายที่วิ่งบนล้อ ทำให้ควบคุมเส้นทางการกัดชิ้นงานได้ยากและไม่เข้าถึงในบริเวณพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ เครื่องมือการทำงานชนิดนี้จึงไม่ได้ถูกใช้ในการทำโครงงานนี้

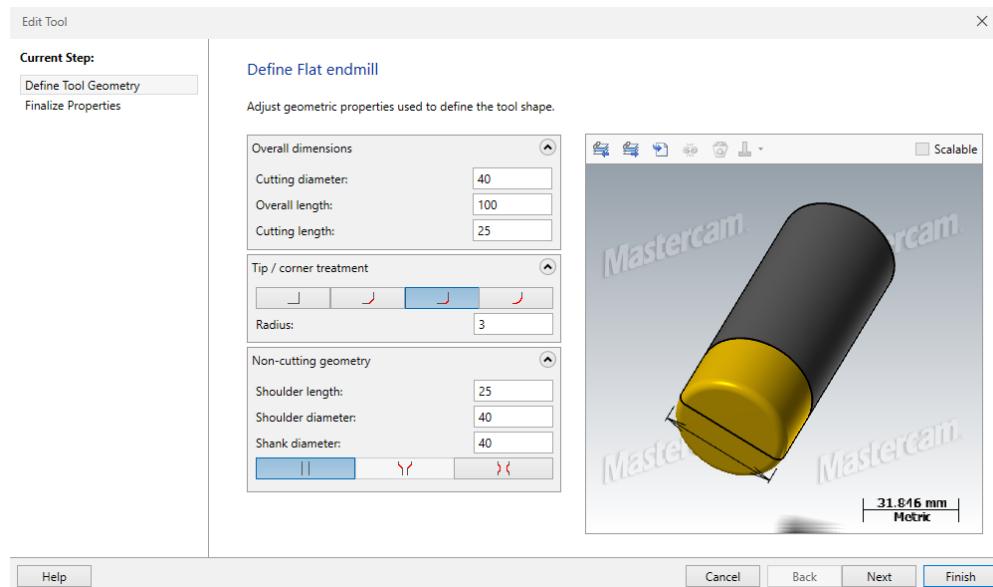
- Multisurface Milling

เครื่องมือในกระบวนการการกัดของเครื่อง CNC รูปแบบ multiaxis ที่คำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของมีดกัดให้กัดชิ้นงานด้วยหน้าตัดของมีด ตำแหน่งการกัดจะต้องอ้างอิงจากพื้นผิวของชิ้นงาน ทำให้เครื่องมือนี้สามารถเลือกการทำงานได้บนพื้นผิวที่ต้องการในทุกขนาดและยังสามารถออกแบบรูปแบบเส้นทางการกัดชิ้นงานและแปลง G-code ด้วยเครื่อง CNC ในโครงงานนี้ ผู้จัดทำจะเรียกการทำงานตั้งแต่การเคลื่อนที่แรกของมีดจนสิ้นสุดการทำงาน 1 รอบว่า 1 โปรแกรม

ในการใช้งานเครื่องมือชนิดนี้จำเป็นจะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอันได้แก่

1. มีดกัดชิ้นงาน

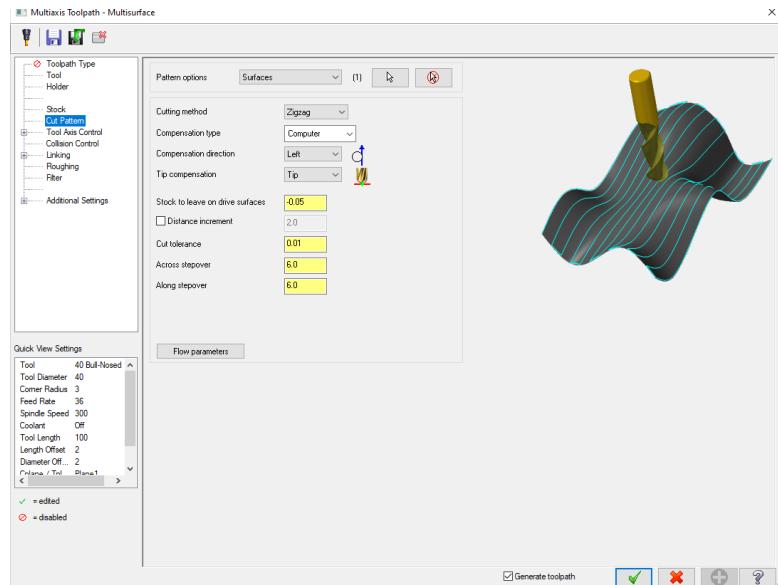
ผู้จัดทำได้สร้างมีดกัดชิ้นงานให้มีขนาดเท่ากับหน้าตัดสายพานของแท่นขัดกระดาษทรายที่ใช้สำหรับเจียระไนด้วยหุ่นยนต์ มีดกัดชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะไม่มีรูมีความโค้งที่หน้าตัดของใบมีดอ้างอิงจากตำแหน่งตั้งฉากกับจุดศูนย์กลางของล้อสายพานที่มีพื้นที่ในการขัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง โดยจุดอ้างอิงตำแหน่งของมีดที่ใช้กัดชิ้นงานจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดมีดกัด



รูปที่ 24 ภาพหน้าต่างการออกแบบมีดกัดชิ้นงาน

2. พื้นผิวในการกัดชิ้นงาน

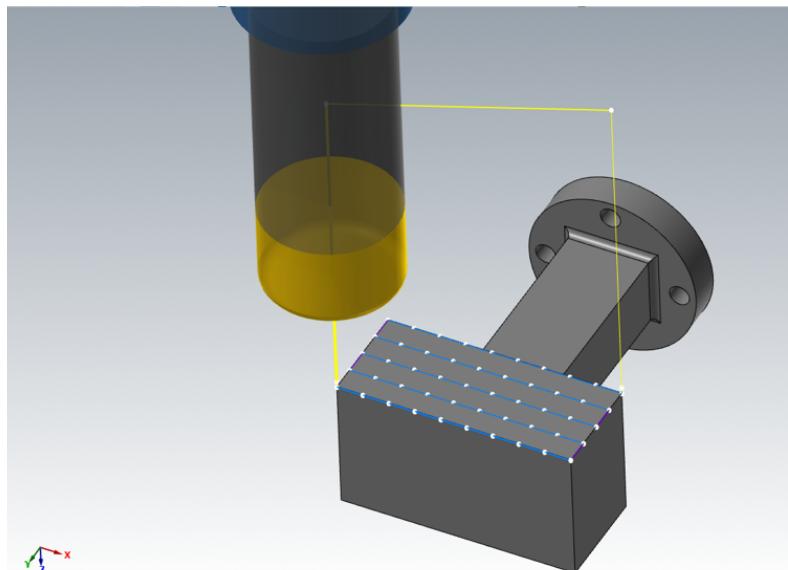
เครื่องมือ Multisurface milling นี้ จะกัดชิ้นงานตามพื้นที่ผิวที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนด โดยสามารถตั้งค่าให้เลือกพื้นที่ผิวจำนวนไม่จำกัดในการกัดชิ้นงาน 1 โปรแกรม ซึ่งลำดับการเลือกพื้นผิวจะส่งผลต่อการคำนวณเส้นทางการกัดชิ้นงานเช่นกัน



รูปที่ 25 ภาพหน้าต่างควบคุมการตั้งค่าพื้นผิวที่ต้องการกัด ทิศทางการกัด ระยะตั้งความลึกการกัด และการตั้งค่าอื่นๆ

3. ทิศทางการกัดชิ้นงาน

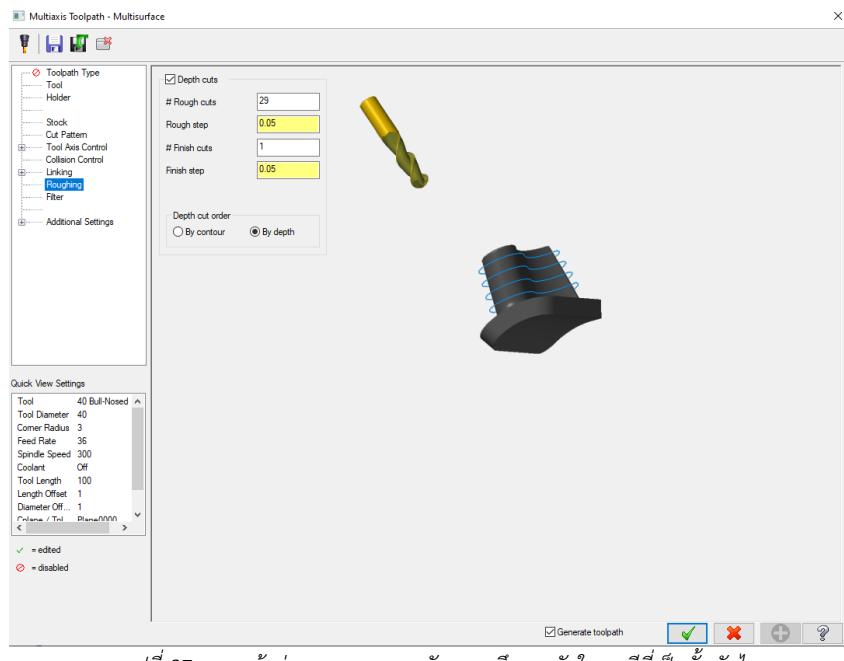
หลังจากเลือกพื้นผิวในการกัดชิ้นงานแล้วระบบจะออกแบบเส้นทางการกัดให้อย่างอัตโนมัติ แต่ผู้ใช้โปรแกรมสามารถกำหนด รูปแบบการกัดชิ้นงาน ทิศทางการกัด จุดเริ่มต้นของมีดกัด ระยะการกัด ให้อยู่ในแนวทางตามที่ต้องการได้ อีกทั้งยังสามารถตั้งค่าความถี่ของจุดการกัดทั้งในแนววางและแนวยาวเพื่อเพิ่มความละเอียดของเส้นทางการขัดได้อีกด้วย



รูปที่ 26 ภาพแสดงถึงเส้นทางการกัดชิ้นงาน(เส้นสีฟ้า)และความถี่ของจุดการขัด(จุดสีขาว)

4. ระดับความลึกในการกัดชิ้นงาน

อีพารามิเตอร์สำคัญในการกัดชิ้นงานในโปรแกรม CAM นี้คือระดับความลึกในการกัดชิ้นงาน เพราะเป็นระยะที่จะกำหนดให้มีได้กัดเคลื่อนที่กัดลงไปในชิ้นงาน ในอีกนัยคือระยะความลึกที่หุ่นยนต์จะนำชิ้นงานไปเจียร์ในกับแท่นขัดกระดาษทรายในแต่ละ 1 โปรแกรม ซึ่งการตั้งค่าความลึกในการกัดชิ้นงานนั้นสามารถเลือกระดับความลึกในแต่ละโปรแกรมให้ลึกสม่ำเสมอในระดับเดิมหรือเลือกให้เพิ่มระดับความลึกในการขัดเป็นขั้นบันไดให้ลึกลงมากขึ้นจนถึงระดับที่ต้องการได้



รูปที่ 27 ภาพหน้าต่างการควบคุมระดับความลึกการกัดในกรณีที่เป็นขั้นบันได

5. พารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง

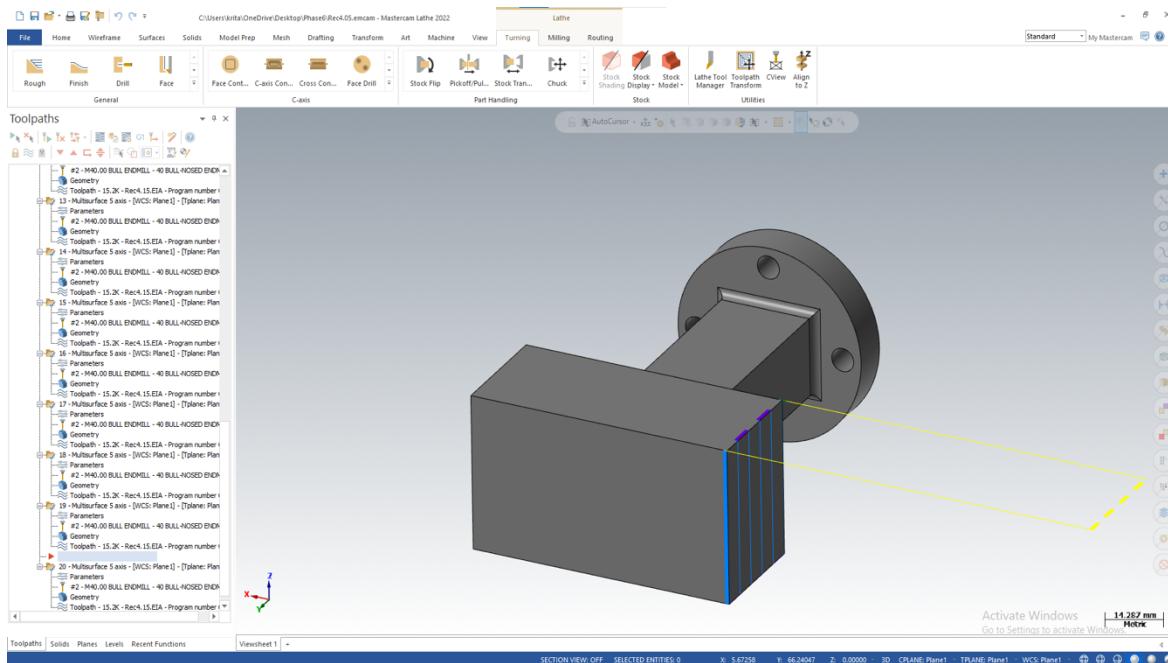
พารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องที่สามารถตั้งค่าได้ ได้แก่ ความเร็วในการกัดของใบมีด ตำแหน่งเข้าออกของมีดทั้งระยะดึงกลับของมีดกัดเมื่อจบแต่ละโปรแกรม ความคลาดเคลื่อนในการกัดที่ยอมรับได้ ฯลฯ

ภายหลังจากการตั้งค่าทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นโปรแกรมก็จะคำนวณเส้นทางการกัดชิ้นงานออกมาเป็น path การเดินทางของมีดกัด ก่อนจะใช้ post-processor ของเครื่อง CNC คำนวณออกมาเป็น G-code เพื่อนำข้อมูลตำแหน่งและองศาการวางตัวของมีดกัดไปใช้งานต่อไป

4.1.1.1 การประยุกต์ใช้เครื่องมือกับชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

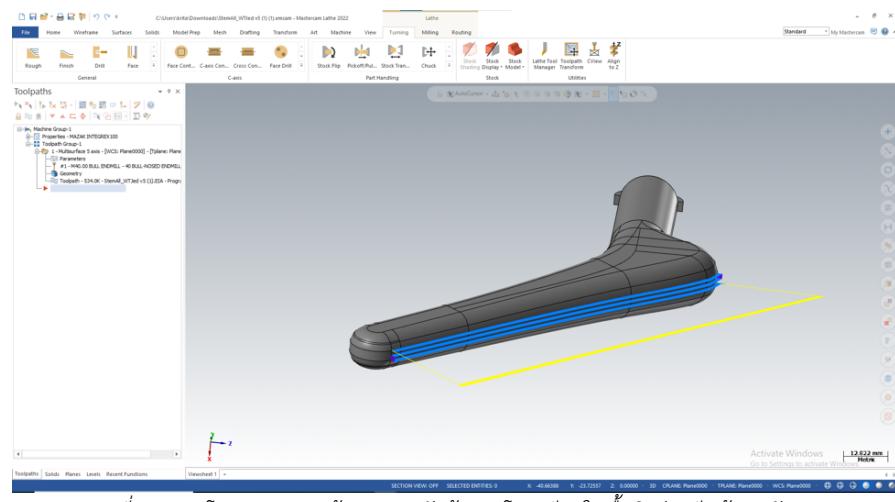
การพัฒนาวิธีการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิริเจียระไนได้ทดสอบการกัดชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAM กับสองชิ้นงาน ได้แก่ ทรงสี่เหลี่ยมอย่างง่าย และ ก้านสะโพกเทียม

สำหรับทรงสี่เหลี่ยม ผู้จัดทำได้ออกแบบเส้นทางการกัดให้กับ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านหน้าชิ้นงาน ด้านหน้าของ สันชิ้นงาน และ ด้านข้างของสันชิ้นงาน เพื่อวัดค่าความแตกต่างของส่วนของ ความสูง ความยาว ความกว้าง และ ความเรียบผิวสัมผัส ของทรงสี่เหลี่ยมในพื้นผิวที่โดนเจียระไนด้โดยกระดาษรายสายพาน โดยการออกแบบเส้นทาง การกัดชิ้นงานนั้นมีพิเศษทางในแนวยาวตามพื้นที่ผิว มีระยะความถี่ของจุดการกัดในแนวยาวและแนวยาว 8 ไมโครเมตรต่อจุด กำหนดให้ความลึกโดยรวมเมื่อจากการกัดเป็น 1 มิลลิเมตร แบ่งเป็นการทดสอบ 3 ระดับความ ความลึกในการกัดของแต่ละโปรแกรมเพิ่มขึ้นรังส์ละ 0.1 0.15 และ 0.2 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบความแตกต่างของ การออกแบบเส้นทางสำหรับหุ่นยนต์เจียร์ใน ชิ้นเส้นทางที่โปรแกรม CAM ได้สร้างขึ้นนี้จะถูกประยุกต์และนำไปใช้ กับหุ่นยนต์เพื่อเจียร์ในทรงสี่เหลี่ยมที่สร้างจากสตูพลาสติก PLA และ เหล็ก

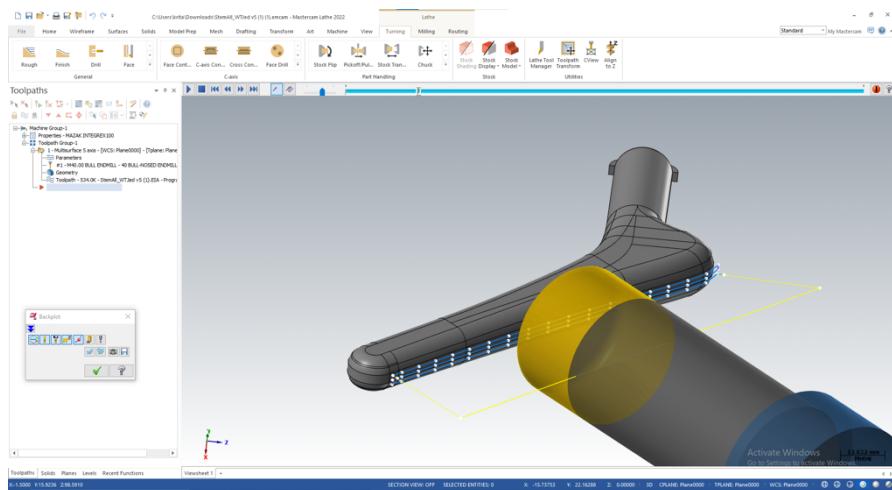


รูปที่ 28 ภาพเส้นทางจำลองการกัดชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมและโปรแกรมล็ังควบคุมการทำงาน(แบบด้านซ้าย)

สำหรับก้านสะโพกเทียม ผู้จัดทำได้ออกแบบเส้นทางการกัดชิ้นงานที่ตำแหน่งด้านหลังของชิ้นงานก้านสะโพกเป็นหลัก โดยมุ่งเป้าเพื่อเจียร์ในปีกส่วนเกินของก้านสะโพกที่เกิดจากการหล่อขึ้นรูป ให้มีลักษณะผิวเรียบเท่ากันทั้งชิ้นก่อน แล้วจึงทำโปรแกรมเจียร์ในก้านสะโพกให้มีขนาดความเรียบตามต้องการ โดยสมมุติให้ความลึกที่ต้องการขัดจากก้านสะโพกเทียมที่หล่อมาเป็น 1 มิลลิเมตร กำหนดให้ความลึกในแต่ละโปรแกรมเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 มิลลิเมตร เนื่องจากรัศมีที่ผลิตก้านสะโพกเทียมเป็นสแตนเลสและโคบอลต์โครเมียมที่มีความแข็งสูง กำหนดให้มีระยะความถี่เป็น 8 ไมโครเมตรต่อจุดและทิศทางการขัดเป็นตามแนวของก้านสะโพกเทียมเพื่อความรวดเร็วในการเจียร์ใน โดยหุ่นยนต์จะทำการเจียร์ในทั้งหมด 20 ครั้งเพื่อให้ครบ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 29 ภาพโปรแกรมและเส้นทางการกัดก้านสะโพกเทียมในพื้นผิวล่วงปีกด้านหลัง



รูปที่ 30 ภาพจำลองกระบวนการกัดก้านสะโพกเทียมด้วยมีดกัดในพื้นผิวล่วงปีกด้านหลัง

4.1.2 G-code

G-code คือ รหัสคำสั่งที่ใช้ควบคุมการทำงานเครื่องจักร CNC ให้ดำเนินตามโปรแกรมควบคุมการทำงาน (โปรแกรมCAM) เครื่อง CNC จะมีหน้าที่อ่านรหัสคำสั่งจาก G-code ที่มีความหมายเฉพาะเพื่อรับคำสั่งของทำงานในแต่ละบรรทัด G-code จะถูกสร้างขึ้นจากการประมวลผลของโปรแกรม CAM ที่ผู้ใช้งานได้สร้างรูปแบบการทำงานของเครื่อง CNC ผ่านตัวแปลงที่เรียกว่า post-processor ซึ่ง post-processor ของแต่ละเครื่อง CNC ก็จะมีลักษณะเฉพาะตามรูปแบบการควบคุมอุปกรณ์ของแต่ละเครื่อง

จากความรู้เกี่ยวกับ G-code ในเบื้องต้นผู้จัดทำได้นำองค์ความรู้มาประยุกต์เข้ากับโครงงานนี้ เพื่อหาตำแหน่งของมีดกัดเทียบกับแกนอ้างอิงที่ต้องการด้วยข้อมูลจาก G-code ด้วยการใช้โปรแกรม Mastercam 2022 ที่ได้ออกแบบเส้นทางการเจียร์ในมาแล้วให้สร้าง G-code จาก post-processor ของเครื่อง Mazak intrexegrex100 ที่เป็นเครื่อง CNC รูปแบบควบคุมมีดกัดใน 5 แกน

สำหรับค่าตัวเลขข้อมูลที่สำคัญจาก G-code ที่ผู้จัดทำต้องการเก็บค่าเพื่อแปลงเป็นข้อมูลระบบตำแหน่งของหุ่นยนต์มี 5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมีดกัด ได้แก่

- พารามิเตอร์ X : ตำแหน่งพิกัดของมีดกัดในแนวแกน X
- พารามิเตอร์ Y : ตำแหน่งพิกัดของมีดกัดในแนวแกน Y
- พารามิเตอร์ Z : ตำแหน่งพิกัดของมีดกัดในแนวแกน Z
- พารามิเตอร์ B : องศาการวางตัวการหมุนรอบแกน Y (Pitch)
- พารามิเตอร์ C : องศาการวางตัวการหมุนรอบแกน Z (Yaw)

นอกจากนี้ยังมีคำสั่ง G-code บางค่าที่นำสนใจทำให้ทราบถึงคำสั่งของการทำงานได้ เช่น

- G00 : คำสั่งเดินมีดกัดด้วยความเร็ว Rapid
- G01 : คำสั่งเดินมีดกัดด้วยความเร็ว Feedspeed
- G02 : คำสั่งเดินมีดกัดเป็นส่วนโค้งตามเข็มนาฬิกา
- G03 : คำสั่งเดินมีดกัดเป็นส่วนโค้งทวนเข็มนาฬิกา
- G43.4 : คำสั่งแปลงเส้นทางของตำแหน่งนำเครื่องมือที่กำหนดไว้ในโปรแกรมเป็นตำแหน่งและทิศทางสำหรับแกนเชิงเส้นและแกนหมุนของเครื่อง

```
G43.4 H002
G00 X-31.773 Y72. Z-120.845 B178.464 C0.
G18 X-34.399 Z-22.88
G01 X-34.453 Z-20.881 F600.
X-28.622 Z-20.724 F36.
X-22.79 Z-20.568
X-16.959 Z-20.412
X-11.128 Z-20.255
```

4.2 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

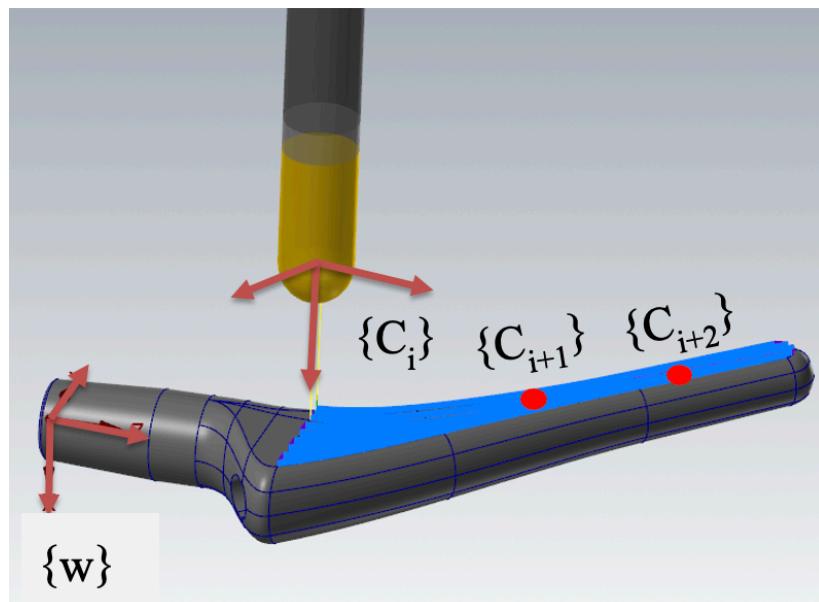
จุดประสงค์สำคัญที่ต้องพัฒนา Post processor นี้ขึ้นเองเนื่องจากมาจากการปัจจุบันยังไม่มีซอฟแวร์ที่สามารถแปลงโค้ดจาก CAM มาเป็นโค้ดของหุ่นยนต์ อีกทั้งการใช้งานซึ่งแปลงจากการที่ Cutting tool วิ่งไปบนชิ้นงานซึ่งได้จาก CAM ไปเป็นการจับชิ้นงานเพื่อวิ่งขัดไปบนอุปกรณ์ขัด จึงทำให้ต้องพัฒนา Postprocessor ขึ้นเอง นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลอย่างปัจจัยเช่น โปรแกรมทั้งใน CAM และหุ่นยนต์เป็นคนละภาษา กัน จำนวนศาสตร์ของ CNC เป็น 5 DOF และหุ่นยนต์ 6 DOF ซึ่งไม่เท่ากัน ลำดับการบอก Position และ Orientation ไม่เหมือนกัน และสุดท้ายฟังก์ชันการใช้งานในโครงการนี้จำเป็นต้องมีการดำเนินการจาก G-Code ก่อนนำไปใช้งาน

โดย Postprocessor นี้ได้ใช้ภาษา Python ใน การพัฒนาขึ้น โดย Postprocessor นี้สามารถแปลงโค้ดของเครื่อง CNC รุ่น Integrex ให้เป็นโค้ดของหุ่นยนต์ Fanuc ได้ หลังจากที่ได้โปรแกรมของหุ่นยนต์แล้ว จะนำโปรแกรมนี้เข้า Simulation เพื่อ Setup ตำแหน่ง และจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้เหมาะสม และมั่นใจว่า หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ได้ถูกต้อง

4.2.1 Post processor

4.2.1.1 หลักการทำงาน

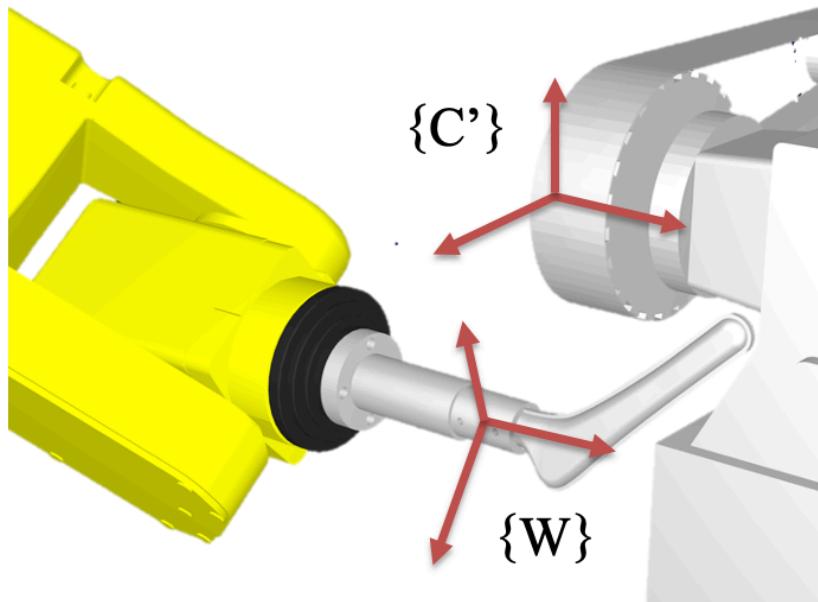
หลักการแปลงตำแหน่ง เริ่มจากใช้ CAM จำลองการขัดชิ้นงาน สิ่งที่ได้คือตำแหน่ง และมุมเอียง ของ Cutting tool หรืออุปกรณ์ขัด เทียบกับแกนอ้างอิงของชิ้นงาน สามารถเขียนในรูปแบบ homogeneous transformation matrix ได้ดังนี้ ${}^W_C_i T$ โดย $\{W\}$ หมายถึงแกนอ้างอิงของ workpiece หรือชิ้นงาน และ $\{C_i\}$ แทน แกนอ้างอิงของอุปกรณ์ขัด โดย ${}^W_C_i T$ คือสิ่งที่ได้จาก CAM แต่แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถรับค่าเหล่านี้ได้จึงต้องมีเพิ่มกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 แกนอ้างอิงของ Cutting tool เคลื่อนที่ชิ้นงาน

สิ่งที่ได้จาก CAM คือ transformation matrix ของ Cutting tool เพียบกับชิ้นงาน แต่ในโปรเจคนี้จะเป็น การที่ชิ้นงานเป็นตัวเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ขัดซึ่งในที่นี่คือเครื่องขัดกระดาษทรายเป็นสิ่งที่อยู่นิ่งแทน ดังนี้จึงต้องมี การแปลง transformation matrix จาก CAM ${}_{C_i}^W T$ เป็น ${}_{W_i}^{C'} T$ แทน และสามารถทำได้โดยการ Inverse matrix ที่ได้มาดังสมการ

$${}_{C_i}^W T^{-1} = {}_{W_i}^{C'} T$$



รูปที่ 33 แสดงกรอบอ้างอิงที่ถูกแปลง

ซึ่งความหมายของ ${}_{W_i}^{C'} T$ จะหมายถึง transformation matrix ของแกนอ้างอิงชิ้นงาน ณ ตำแหน่ง i ไดๆ เพียบแกนอ้างอิงของอุปกรณ์ขัดซึ่งอยู่นิ่ง จากนั้นสำหรับหุ่นยนต์ซึ่งมี 6 แกน การจะสร้าง transformation matrix จากฐานของหุ่นยนต์ไปยังปลายแขนของหุ่นยนต์ ${}_6^0 T$ และนี้จะเป็นค่าที่ป้อนให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถทำได้โดยนำ Matrix ระหว่างแกนคูณกัน ดังนี้

$${}_1^0 T {}_2^1 T {}_3^2 T {}_4^3 T {}_5^4 T {}_6^5 T = {}_6^0 T$$

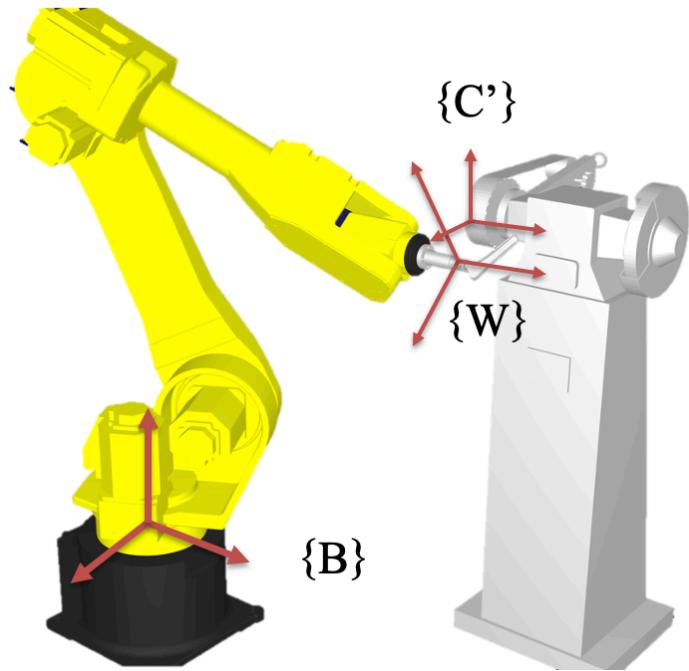
ซึ่งหลักการการสร้าง Transformation matrix ของแต่ละแกนจะใช้หลักการตัวแปรแบบ Denavit hartenberg ซึ่งจะอธิบายภายหลัง โดยแกนอ้างอิง {0} หรือ {B} คือแกนอ้างอิงฐานของหุ่นยนต์ และแกนอ้างอิง {6} คือแกนอ้างอิงสุดท้ายของหุ่นยนต์ หรือปลายแขนของหุ่นยนต์ การใช้หุ่นยนต์โดยทั่วไปแล้วจะมีการนำขึ้นงานไปติดที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ {Tool} ซึ่ง transformation matrix ${}_{Tool}^6T$ ในโครงงานนี้ {Tool} หรือ {W} จะหมายถึงตัวขึ้นงาน หรือตัวก้านสะโพกเทียมนั้นเอง เชื่อมเป็นสมการได้ดังนี้

$${}^0T_{Tool} {}^6T = {}_{Tool}^0T$$

ในหุ่นยนต์สามารถถักกับหนดแกนอ้างอิงได้ (สำหรับ Fanuc จะเรียกรอบนี้ว่า Userframe) เพื่อความสะดวก ประโยชน์ของการอิงนี้คือตำแหน่งที่ป้อนให้หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เทียบกับกรอบที่สร้างขึ้นนี้ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการทำโครงงานนี้เนื่องจากจะสามารถเปลี่ยนตำแหน่งที่ขัดได้ง่าย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5 ในโครงงานนี้จะตั้งแกนอ้างอิงบนแท่นขัดกระดาษทราย หรือ Cutting tool {C'} นำทุก transformation matrix มาใช้ Matrix สุดท้ายได้ดังนี้

$${}^B_6T {}_{Tool} {}^6T = {}^B_C T {}^C_W C' T$$

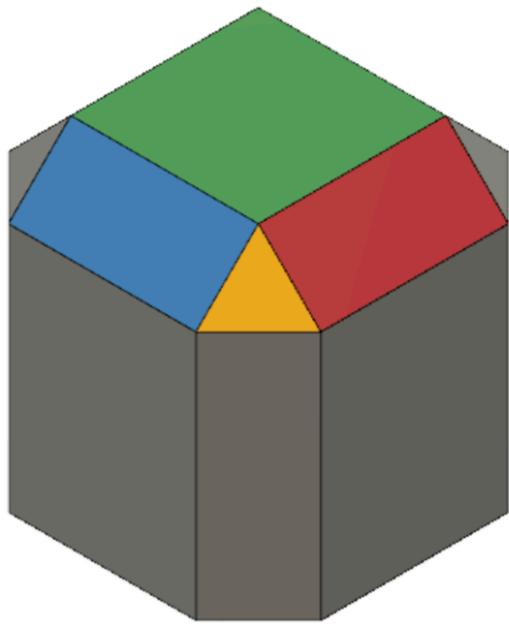
ในสมการข้างต้น {B}คือแกนอ้างอิงฐานของหุ่นยนต์ {Tool} = {W} ซึ่งคือแกนอ้างอิงของชิ้นงาน ${}^B_C T$ คือ transformation matix ของจุดที่ใช้ขัดบนแท่นกระดาษทรายเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ จะเป็นMatrix คงที่ ซึ่งหากต้องการจะเปลี่ยนจุดขัดบนกระดาษ ก็สามารถมาเปลี่ยนค่าใน Matrix นี้ได้ โดย B_6T จะเป็นรูปแบบที่หุ่นยนต์สามารถเข้าใจ



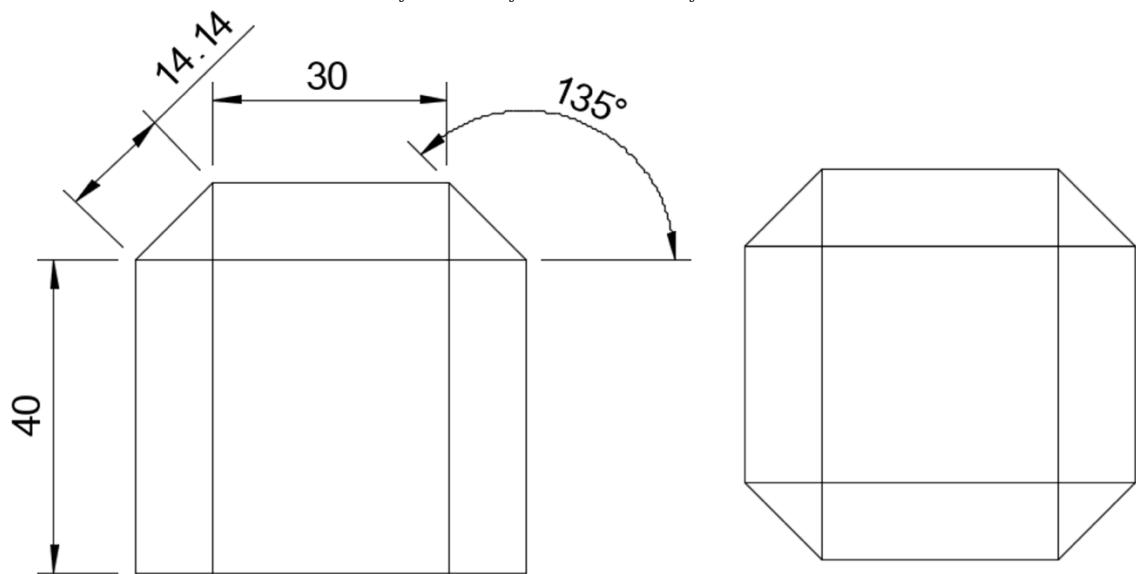
รูปที่ 34 ภาพรวมแกนอ้างอิงของหัวระบบ

4.2.1.2 การสร้าง Homogeneous transformation matrix จาก CAM

ในหัวข้อนี้จะแสดงการสร้าง homogeneous transformation matrix จาก G-Code ซึ่งจำเป็นต้องทราบ ลำดับ และระบบในการระบุ ตำแหน่งและทิศทาง ของแกนสามมิติของ cutting tool เทียบกับแกนอ้างอิงของ workpiece หากลำดับหรือระบบผิดจะส่งผลทำให้ค่าใน transformation matrix ผิด ซึ่งระบบการบอก ตำแหน่ง และทิศทางของแกนอ้างอิง มีด้วยกัน 2 รูปแบบหลักๆ ได้แก่ Euler angle และ Fixed angle ทั้งนี้ระบบการบอก ตำแหน่งและทิศทางของแกนอ้างอิงของแต่ละเครื่องจะไม่เหมือนกัน เพื่อที่จะทราบลำดับ และระบบ สามารถทำได้โดยการ พิสูจน์จากรูปทรงอย่างง่ายที่ทราบค่า ในที่นี่ผู้จัดทำได้ใช้รูปทรงลูกบาศก์ในการพิสูจน์

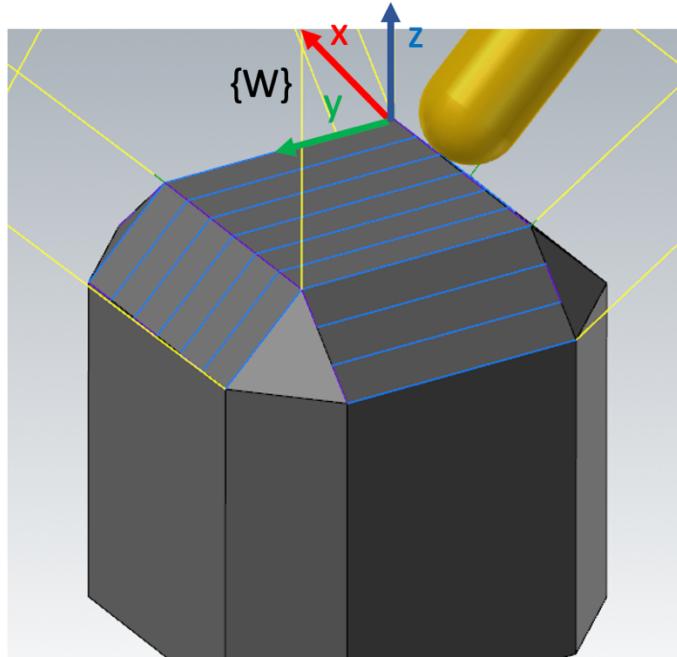


รูปที่ 35 ทรงลูกบาศก์สำหรับการพิสูจน์



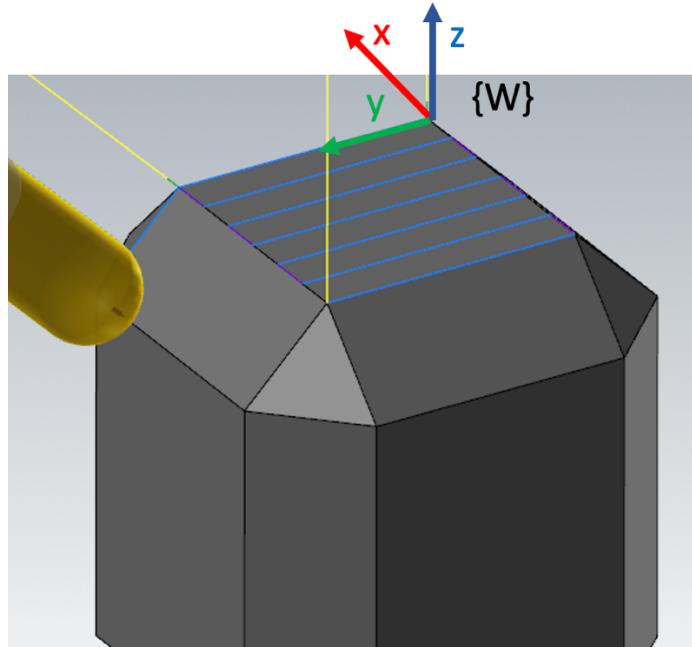
รูปที่ 36 ผู้มอง side view และ top view พร้อม Dimension

เมื่อได้ลูกบาศก์ที่ทราบค่าแล้ว ลำดับต่อไปคือนำลูกบาศก์นี้เข้าโปรแกรม CAM เพื่อสร้างวิธีการขัดบนพื้นผิวของลูกบาศก์ เริ่มจากหน้าสีเขียวในรูปที่ XX และไปหน้าอื่นๆต่อไป



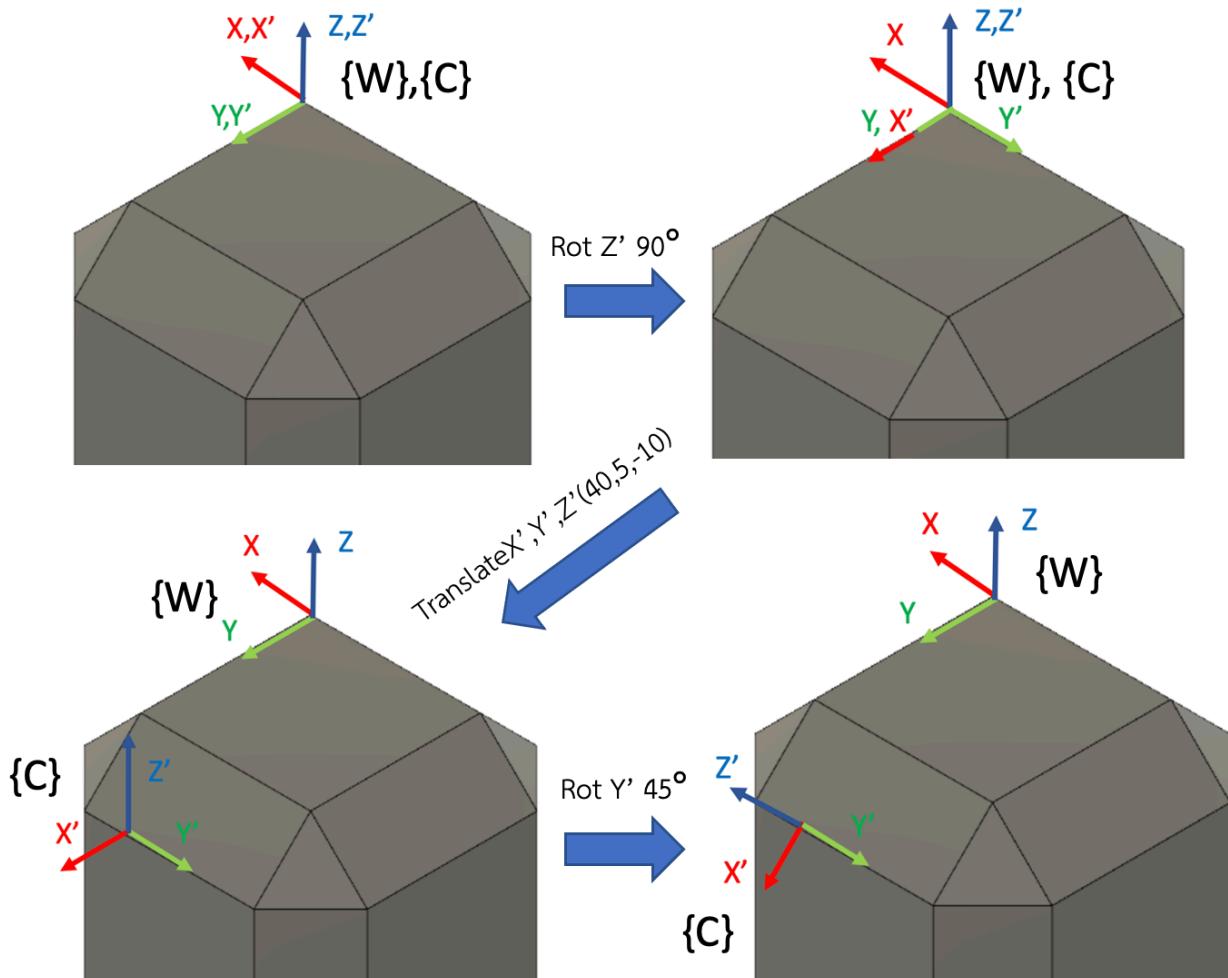
รูปที่ 37 เส้นทางการเจียร์ในของลูกบาศก์

เมื่อได้รับข้อมูลของลูกบาศก์จากโปรแกรม CAM แล้ว ลำดับต่อไปคือสร้าง G-Code โดยใช้ Post processor ของเครื่อง CNC ที่มี ซึ่งในที่นี้ใช้เครื่อง Integrex ข้อควรระวังคือเนื่องจาก เครื่อง CNC integrex นี้เป็นเครื่องสำหรับ Turning แกนอ้างอิงของชิ้นงานใน CAM และ Integrex จะแตกต่างกัน หลังจากได้ G-Code เป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำ G-Code มาเทียบตำแหน่งของ Cutting tool ใน Simulation เพื่อที่จะหาลำดับการบอก Position และ Orientation ของเครื่อง CNC เพื่อที่จะได้นำมาสร้าง Transformation matrix ได้อย่างถูกต้อง ในที่จะยกตัวอย่าง มุมที่ Cutting tool เอียง เป็นตัวอย่างการหาลำดับการบอก Position และ Orientation ดังรูปที่ YY



รูปที่ 38 ตำแหน่ง Cutting tool ที่นำมายกตัวอย่าง

สำหรับ G-Code ของตำแหน่งตามรูปที่ YY คือ X40.0 Y5.0 Z-10 B45.0 C90.0 ต่อจากนี้คือทำการหา ลำดับ และระบบของ CNC ซึ่งสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ เริ่มจากกำหนดให้แกนอ้างอิงของชิ้นงาน และแกนอ้างอิง ของ Cutting tool อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน จากนั้นหมุนแกนอ้างอิง Cutting tool 90 องศา รอบแกน Z ของแกน อ้างอิงของชิ้นงาน จากนั้นเลื่อนแกนอ้างอิงตั้งต้นตามแกน X40 Y5 Z-10 ขั้นตอนสุดท้ายคือหมุนแกน Y แกนอ้างอิง ที่ถูกเลื่อนมา เป็นอันเสร็จสิ้น โดยจะแสดงการเคลื่อนที่ของแกนอ้างอิงดังรูปที่ ๔๔ โดยกำหนดให้แกน XYZ เป็น แกนอ้างอิงของชิ้นงาน {W} แกน X',Y',Z' เป็นแกนอ้างอิงของ Cutting tool {C}



รูปที่ 39 แสดงลำดับการเคลื่อนที่ของแกนอ้างอิง

จากลำดับ และวิธีการการย้ายหรือหมุนแกนอ้างอิง ที่พิสูจน์มาซึ่งพิสูจน์มา จะได้ว่าเป็นการใช้ระบบหั้งแบบ Euler angle และ Fixed axis ซึ่งเขียนลำดับได้ดังนี้

$$RotZ'(C) * TranslX'Y'Z'(X, Y, Z) * RotY'(B)$$

สามารถเขียนเป็น transformation matrix ของแต่ละตัวแปรได้ดังนี้ ได้ดังนี้

$$RotZ'(C) = \begin{bmatrix} \cos(C) & -\sin(C) & 0 & 0 \\ \sin(C) & \cos(C) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$TranslX'Y'Z'(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 0 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotY'(B) = \begin{bmatrix} \cos(B) & 0 & \sin(B) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(B) & 0 & \cos(B) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

คูณ Matrix ทั้ง 3 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

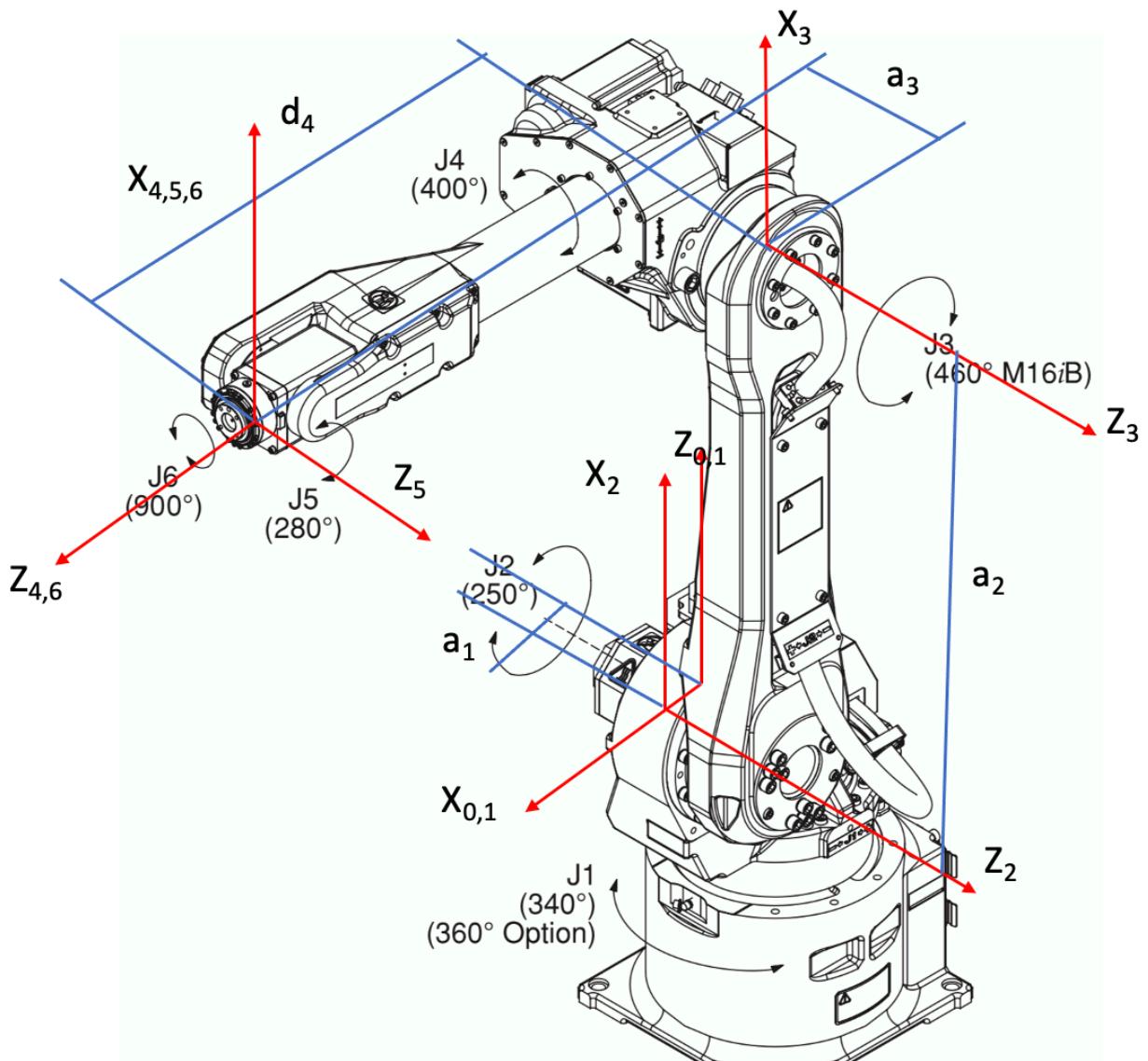
$${}_{C_i}^{W_T} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) \sin(\theta_2) & X \cos(\theta_3) - Y \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) & Y \cos(\theta_3) + X \sin(\theta_3) \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ในขั้นตอนนี้จะได้ Homogeneous transformation matrix จาก CAM แบบ 5 DOF เป็นที่เรียบร้อย ลำดับต่อไปคือการหา transformation matrix ของหุ่นยนต์ 6 DOF

4.2.1.2 การสร้าง Homogeneous transformation matrix ของ หุ่นยนต์

ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการหา Homogeneous transformation matrix ที่จะป้อนให้หุ่นยนต์ซึ่งวิธีทำจะแตกต่างกับการทำของ CAM โดยจะใช้หลักการเฉพาะของหุ่นยนต์ ซึ่งคือการใช้หลักการ Denavit hartenberg ในการหา โดยจะเริ่มจากการหา Forward kinematicของหุ่นยนต์ Fanuc

ในส่วนของ forward kinematics ของหุ่นยนต์ Fanuc จะใช้หลักการ Denavit hartenberg ในการสร้าง transformation matrix ของแกนต่างๆของหุ่นยนต์ เทียบกับฐานของหุ่นยนต์ สำหรับตัวแปรในการสร้าง matrix แบบ denavit hartenberg จะมีด้วยกันทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ 1. Link length (a_i) ซึ่ง 2. Link twist (α_i) 3. Link offset (d_i) 4. Joint angle (θ_i) จากนั้นกำหนดแกนบนหุ่นยนต์ Fanuc ดังรูปที่ TT



รูปที่ 40 แสดงตำแหน่งแกนตามแบบ Denavit hartenberg

ชื่งสามารถระบุตัวแปรทั้ง 4ตัวของแต่ละแกนได้ดังตาราง

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90	a_1	0	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	-90	a_3	d_4	θ_4
5	90	0	0	θ_5

6	-90	0	0	θ_6
---	-----	---	---	------------

ตารางที่ 1 ตัวแปรลิ๊งของ หุ่นยนต์ Fanuc

เมื่อได้ตัวแปรทั้งหมดแล้วจะสามารถสร้าง Homogeneous transformation matrix ได้โดยนำค่าต่างๆ แทนในสมการ โดยในที่นี้จะแทน $c\theta_i$ และ $s\theta_i$ เป็น $\cos(\theta_i)$ และ $\sin(\theta_i)$ ตามลำดับ หรือ c_i และ s_i แทน $\cos(\theta_i)$ และ $\sin(\theta_i)$

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

นำค่าจากในตารางที่ แทนลงในสมการที่ ดังนี้

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & 0 \\ s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s2 & -c2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 & a_2 \\ s3 & c3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s4 & -c4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c5 & -s5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -s5 & -c5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c6 & -s6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s6 & -c6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

นำ matrix ทั้งหมดมาคูณกัน โดยกำหนดให้ $C_{ij} = CiCj - SiSj$ และ $S_{ij} = CiSj + SiCj$

$${}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = {}^0_6T$$

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & q_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & q_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดย

$$r_{11} = S1[S4S6 - C4C5C6] - C1[C23(S4S6 - C4C5C6) + S23C6S5]$$

$$r_{21} = -C1[C4S6 + C5C6S4] - S1[C23(S4S6 - C4C5C6) - S23C6S5]$$

$$r_{31} = S23[S4S6 - C4C5C6] - C23C6S5$$

$$r_{12} = S1[C4C6 - C5S5S6] - C1[C23(C6S4 + C4C5S6) - S23S5S6]$$

$$r_{22} = -S1[C23(C6S4 + C4C5S6) - S23S5S6] - C1[C4C6 - C5S4S6]$$

$$r_{32} = S23[C6S4 + C4C5S6] + C23S5S6$$

$$r_{13} = C1[S23C5 + C23C4S5] - S1S4S5$$

$$r_{23} = C1S4S1 - S1[S23C5 + C23C4S5]$$

$$r_{33} = S23C4S5 - C23C5$$

$$qx = C1[a1 + a3C23 - d4S23 + a2C2]$$

$$qy = S1[a1 + a3C23 - d4S23 + a2C2]$$

$$qz = -d4C23 - a3S23 - a2S2$$

ในทางที่นี่ เราจะจัดติด Tool ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ในชิ้นงานสร้างเป็น Transformation matrix ก็จะได้ Matrix คงที่ Matrix หนึ่ง

$${}^0_6T_{Tool} {}^6T = {}_{Tool} {}^0T$$

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้าง Matrix ที่จะเป็นตัวบอกให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดบ้างเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ ทั้งนี้หุ่นยนต์ และเครื่อง CNC มีการบอกลำดับ position และ orientation ที่ต่างกัน สำหรับหุ่นยนต์ Fanuc วิธีการอิงจากเว็บไซต์ Robodk จะใช้ระบบแบบ Fixed angle axis แบบ XYZ เขียนเป็นลำดับการคูณ matrix ได้ดังนี้

$$Transl(p_x, p_y, p_z) * RotZ(\theta_z) * RotY(\theta_y) * RotX(\theta_x)$$

ซึ่งสามารถสร้าง Homogeneous transformation matrix แต่ตัวได้ดังนี้

$$Transl(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 0 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotZ(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotY(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotX(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

นำทุก Matrix มาคูณกันจะได้

$$Transl(p_x, p_y, p_z) * RotZ(\theta_z) * RotY(\theta_y) * RotX(\theta_x) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_y)\cos(\theta_z) & \cos(\theta_z)\sin(\theta_x)\sin(\theta_y) - \cos(\theta_x)\sin(\theta_z) & \sin(\theta_x)\sin(\theta_z) + \cos(\theta_x)\cos(\theta_z)\sin(\theta_y) & p_x \\ \cos(\theta_y)\sin(\theta_z) & \cos(\theta_x)\cos(\theta_z) + \sin(\theta_x)\sin(\theta_y)\sin(\theta_z) & \cos(\theta_x)\sin(\theta_y)\sin(\theta_z) - \cos(\theta_z)\sin(\theta_x) & p_y \\ -\sin(\theta_y) & \cos(\theta_y)\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x)\cos(\theta_y) & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อได้ Matrix ตำแหน่งและทิศทางของแกนอ้างอิงของปลายแขน หรือ ปลายชิ้นงาน เทียบกับฐานของหุ่นยนต์แล้ว ขั้นต่อไปคือการหา Inverse kinematic ของหุ่นยนต์ โดย Inverse kinematic จะเป็นการหาค่ามุมองศาสั้ง 6 แกนของหุ่นยนต์เพื่อให้ปลายแขนของหุ่นยนต์ไปอยู่ยังจุดที่ต้องการ ทั้งนี้การหา Inverse kinematic มีความยากกว่า Forward kinematic อย่างมาก เนื่องจากเป็นการแก้สมการแบบ Non-linear equation ซึ่งหมายความว่าจะมีหลายคำตอบหรือไม่มีคำตอบเลยก็ได้ แต่ในปัจจุบันหุ่นยนต์จะมีสมการ Inverse kinematic ติดตั้งอยู่ในเครื่องแล้วจึงไม่จำเป็นต้องหาสมการ Inverse kinematic เอง

$${}^0T = Transl(p_x, p_y, p_z) * RotZ(\theta_z) * RotY(\theta_y) * RotX(\theta_x)$$

4.2.1.4 การสร้าง Post processor

เมื่อได้วิธีการสร้าง Homogeneous transformation matrix ของทั้งเครื่อง CNC และหุ่นยนต์ Fanuc แล้ว ลำดับต่อจะเป็นการแปลงโค้ดเพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่หุ่นยนต์สามารถเข้าใจได้ โดยเริ่มจากอ่าน G-Code ทีละบรรทัด แล้วนำค่าอินพุตทั้งหมดนั้นสร้าง transformation matrix ของ แกนอ้างอิง Cutting tool เทียบกับ แกนอ้างอิงของชิ้นงานใน Matrix ${}^W_C T_i$ จากนั้นทำการ Inverse เพื่อให้ได้ตำแหน่งและทิศทางของแกนอ้างอิงเป็นแบบที่ แกนอ้างอิงของ Cutting tool อยู่นิ่ง และแกนอ้างอิงของชิ้นงานเป็นตัวเคลื่อนที่ จากนั้นจะทำการติดแกน Cutting tool บนสายพาน และสร้าง Matrix ของตำแหน่งสายพานเทียบกับฐานของหุ่นยนต์เป็น Matrix ดังนี้ ${}^B C T$ จากนั้นการสร้าง Matrix ซึ่งเป็นรูปแบบที่หุ่นยนต์สามารถอ่านออก ${}^B T_{Tool} {}^6 T = {}^B T {}^C {}^W T$ จากนั้นทำการหาค่าจาก Inverse kinematic หรือหาค่า ในรูปแบบ Catesian space ก็ ได้เพื่อนำมาสร้างโค้ดของหุ่นยนต์ ขั้นตอนทั้งหมดนี้ผู้จัดทำได้ใช้ภาษา Python ในการพัฒนา Post processor นี้ขึ้น

4.2.2 โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และโค้ดคำสั่งของหุ่นยนต์ Fanuc

4.2.2.1 โค้ดคำสั่งของหุ่นยนต์

หลังจากที่นำ G-Code ผ่าน Post processor ที่ได้สร้างขึ้น และได้ตำแหน่ง และทิศทางตามแบบที่หุ่นยนต์เข้าใจ ขั้นต่อไปคือการสร้างโค้ดให้ตรง Format ของหุ่นยนต์ โค้ดของหุ่นยนต์ Fanuc จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือ การกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ ความเร็ว ลำดับตำแหน่งที่ต้องการให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปอีกที่ยังเป็นตัวกำหนดตำแหน่งแกนอ้างอิง และแกนอ้างอิงของตัวชิ้นงาน ในส่วนที่สองคือตำแหน่งในรูปแบบ Joint space หรือ Catesian space

```

10:L P[3] 100mm/sec CNT20 ;
11:L P[4] 100mm/sec CNT20 ;
12:L P[5] 100mm/sec CNT20 ;
13:L P[6] 100mm/sec CNT20 ;
14:L P[7] 100mm/sec CNT20 ;
15:L P[8] 100mm/sec CNT20 ;
16:L P[9] 100mm/sec CNT20 ;
17:L P[10] 100mm/sec CNT20 ;
18:L P[11] 100mm/sec CNT20 ;

```

รูปที่ 41 ตัวอย่างโค้ดของหุ่นยนต์ในส่วนที่ 1

```

P[1378]{
    GP1:
        UF : 1, UT : 1,           CONFIG : 'N U T, 0, 0, 0',
        X = 89.26 mm, Y = -39.081 mm, Z = -6.648 mm,
        W = 44.965 deg,          P = 88.916 deg, R = 179.965 deg
    };
P[1379]{
    GP1:
        UF : 1, UT : 1,           CONFIG : 'N U T, 0, 0, 0',
        X = 93.255 mm, Y = -39.081 mm, Z = -6.647 mm,
        W = 44.965 deg,          P = 88.916 deg, R = 179.965 deg
    .

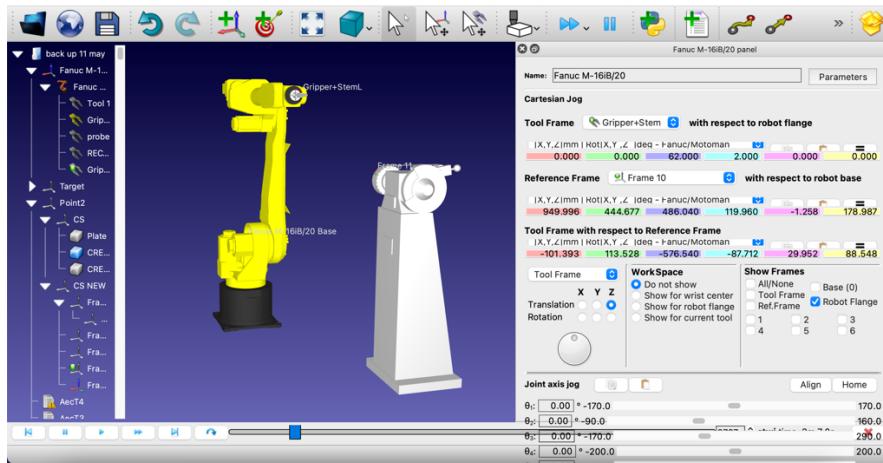
```

รูปที่ 42 ตัวอย่างโค้ดของหุ่นยนต์ในส่วนที่ 2

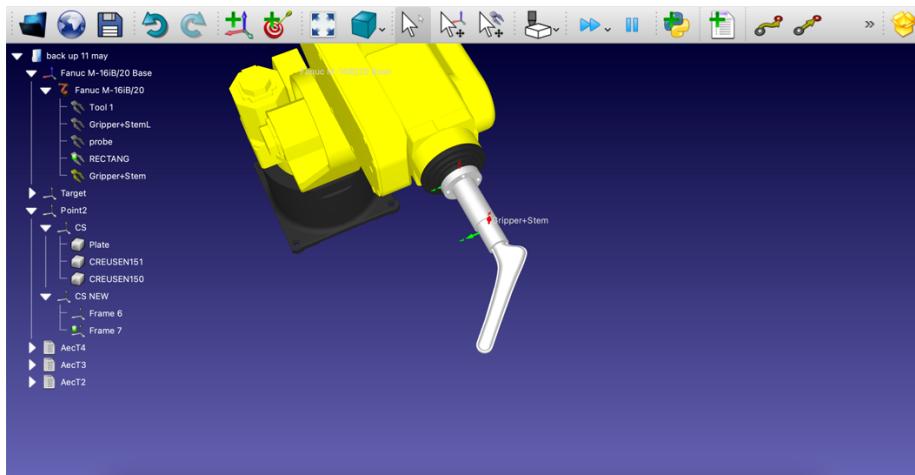
4.2.2.2 RoboDK

โปรแกรมควบคุมและจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ทางผู้ใช้งานจะต้องเลือกหุ่นยนต์ที่ใช้ และอัพโหลดชิ้นงานที่ติดกับหุ่นยนต์(ก้านสะโพกเทียม) และแน่นขัดกระดาษทรายเพื่อใช้ในการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน working space โดยการอัพโหลดโปรแกรมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ได้จาก post processor เมื่อได้ทำขั้นตอนดังกล่าวแล้วเราจะทำการ simulation เพื่อตรวจสอบว่าหุ่นยนต์ไม่เกิด singularity หรือ collision ในระหว่างการเคลื่อนที่ในโปรแกรม

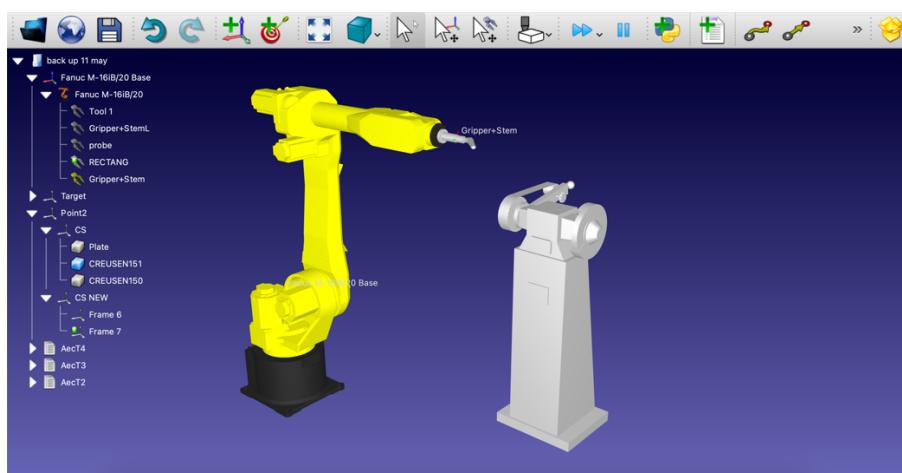
เมื่อตรวจสอบความเรียบร้อยในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แล้ว เราจะนำโปรแกรมที่ได้ไปผ่าน post processor ของ Fanuc R30iA เพื่อแปลงโปรแกรมให้เป็นไฟล์สกุล .LS ซึ่งเป็นสกุลไฟล์ที่สามารถนำไปใช้ต่อได้ในโปรแกรม Roboguide



รูปที่ 43 ภาพรวมโปรแกรม RoboDK



รูปที่ 44 ขั้นงานที่ได้กับหุ่นยนต์(ก้านละโพกเทียม)



รูปที่ 45 ภาพ working space

บทที่ 5 การทดลองกระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิริจัยระใน (Experiment method & Result)

5.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่หุ่นยนต์

ในการทดลองกระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิริจัยระใน ผู้จัดทำต้องการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ว่าสามารถดำเนินการขั้นตอนได้เหมือนกับในโปรแกรมจำลองหรือไม่ ก่อนนำโปรแกรมไปใช้จริงในกับชิ้นงานก้านสะโพกเทียม ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้สร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมอย่างง่ายเพื่อสังเกตความแม่นยำในการเจียร์ในในแต่ละด้านของทรงสี่เหลี่ยมและวัดผลลัพธ์การเจียร์ในสำหรับความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

5.1.1 การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมพลาสติก PLA (3D-printing)

Side	Before (มม.)	After (มม.)	Δ (มม.)	Slope erroe (%)
1A	29.63	29.07	0.56	0.661
1B	29.63	29.53	0.1	
2A	39.54	38.62	0.92	0.273
2B	39.54	38.81	0.73	
3A	69.60	68.76	0.84	0.379
3B	69.60	68.91	0.69	

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมพลาสติก PLA

การเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมพลาสติกจะเจียร์ในด้านละ 1 มิลลิเมตร ทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่ด้าน 1, 2 และ 3 และทำการวัดผลการเจียร์ในด้วยเวอเนียร์เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากการเจียร์ใน โดยจะนำเวอเนียร์วัดส่วนปลายของแต่ละด้วยแล้วบันทึกผล (ด้าน A และ B) และการคำนวณ slope error จะได้มาจากการ $\Delta/Before \times 100$ ซึ่งผลลัพธ์จากการเจียร์ในด้าน 1, 2 และ 3 จะได้ค่า slope error เป็น 0.661%, 0.273% และ 0.379% ตามลำดับ

5.1.2 การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมเหล็ก

Side	Before (มม.)	After (มม.)	Δ (มม.)	Slope erroe (%)
1A	30.00	29.06	0.94	0.585
1B	30.00	29.47	0.53	
2A	39.81	39.09	0.72	0.570

2B	39.81	39.49	0.32	
3A	70.14	69.38	0.76	0.427
3B	70.14	69.55	0.59	

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การทดสอบการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมเหล็ก

ในส่วนของการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมเหล็กจะทำในลักษณะเดียวกันกับการเจียร์ในด้วยทรงสี่เหลี่ยมพลาสติก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการเจียร์ในด้าน 1, 2 และ 3 จะได้ค่า slope error เป็น 0.585%, 0.570% และ 0.427% ตามลำดับ

5.2 การทดสอบการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ใน

สำหรับการทดสอบการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ในนั้น ผู้จัดทำได้ออกแบบการเจียร์ในให้อยู่ในพื้นผิวบริเวณปีกด้านหลังของก้านสะโพกเทียมวัสดุสแตนเลสที่ผลิตด้วยการหล่อ ผลลัพธ์ได้ว่าก้านสะโพกเทียมถูกขัดบริเวณปีกด้านหลังเกินที่มาระบุไว้ 1.5 มิลลิเมตรให้หายไปได้และพื้นผิวด้านหลังของก้านสะโพกเทียมมีความเรียบเสมอกันดังภาพ



รูปที่ 46 ภาพเปรียบเทียบก้านสะโพกเทียมในส่วนด้านหลังก่อนและหลังผ่านการเจียร์ใน

5.3 อภิปรายผลการทดสอบการผลิต

จากการทดลองพบว่าการทดลองเจียร์ในทรงสี่เหลี่ยมที่ผลิตจากพลาสติก PLA มีความคลาดเคลื่อนรวมในทุกด้านเป็น และทรงสี่เหลี่ยมที่ผลิตจากเหล็ก มีความคลาดเคลื่อนรวมในทุกด้านเป็น ในส่วนของก้านสะโพกเทียม ผู้จัดทำได้ทดสอบด้วยการเจียร์ในปีกด้านหลังเพียงเท่านั้นทำให้ยังไม่สามารถสรุปผลลัพธ์ของการทำงานได้

จากการเจียร์ในทรงสี่เหลี่ยมที่ผลิตจากพลาสติก PLA. ในการขัดด้านที่ 1A, 1B, 2A, 2B, 3A และ 3B แต่ละด้านโดยน้ำหนักไปลึกเท่ากับ 0.56, 0.1, 0.92, 0.73, 0.84 และ 0.69 ซึ่งเมื่อขัดจะได้แล้วมีค่า slope error ของด้านที่ 1, 2 และ 3 เป็น 0.661%, 0.273% และ 0.379% ตามลำดับ

จากการเจียระไนทรงสี่เหลี่ยมที่ผลิตจากเหล็ก ในการขัดด้านที่ 1A, 1B, 2A, 2B, 3A และ 3B แต่ละด้าน โดยน้ำหนักตัวที่ได้มาเท่ากับ 0.94, 0.53, 0.72, 0.32, 0.76 และ 0.59 ซึ่งเมื่อขัดแล้วมีค่า slope error ของด้านที่ 1, 2 และ 3 เป็น 0.585%, 0.570% และ 0.427% ตามลำดับ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

สรุปผลการดำเนินงานของโครงการครั้งนี้ ผู้จัดทำได้ศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและเครื่อง CNC จนสามารถหาความสัมพันธ์และประยุกต์ใช้โปรแกรมที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม การผลิตในปัจจุบันเพื่อสร้างโปรแกรมการทำงานสำหรับควบคุมหุ่นยนต์เพื่อเจียร์ในชิ้นงานได้สำเร็จ โปรแกรมการทำงานที่ผู้จัดทำได้สร้างขึ้นมีพื้นฐานจากการใช้ Homogenous transformation แปลงข้อมูลที่ได้จาก G-code สำหรับควบการทำงานของเครื่อง CNC ที่สามารถบอกราคาเด่นของอ้างอิงของจุดมีดกัดเทียบกับแกน อ้างอิง โดยผู้จัดทำได้สร้าง Post-processor ที่มีหน้าที่แปลงข้อมูลที่ได้ในรูปแบบ Transformation matrix ทั้งหมดมาอยู่ในรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์เทียบกับฐานของหุ่นยนต์แทน ก่อนนำโปรแกรมการทำงานที่ผู้จัดสร้างขึ้นไปทดลองควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม Fanuc รุ่น M-16iB/20 ให้สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบและนำไปเจียร์ในชิ้นงานที่ทดสอบได้แก่ ทรงสี่เหลี่ยมพลาสติก PLA ทรงสี่เหลี่ยมเหล็กและก้านสะโพกเทียมในส่วนปีกด้านหลัง พบว่ามีผลลัพธ์ความคาดเคลื่อนของการเจียร์ในค่อนข้างต่ำอีกทั้งพื้นผิวของชิ้นงานมีความเรียบสามารถนำไปใช้งานได้ ทั้งนี้ผลการดำเนินงานอาจมีความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง และโครงการนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อให้โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์สมบูรณ์มากยิ่งเพื่อเป็นอีกหนึ่งองค์ความรู้ในด้านวิธีการเจียร์ในที่อาจนำไปใช้ได้ในอุตสาหกรรมการผลิตในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการนี้สามารถพัฒนากระบวนการผลิตก้านสะโพกเทียมด้วยหุ่นยนต์วิธีเจียร์ในชิ้นงานน้ำไปพัฒนาและต่อยอดเพิ่มเติมได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ผู้จัดทำจึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาโครงการในอนาคตดังนี้

1. ด้านอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

- สามารถพัฒนาส่วนของแทนขัดกระดาษทรายให้มีหลากหลายรูปแบบมากขึ้น ทั้งในพื้นที่หน้าตัดของล้อสายพาน รูปร่าง และขนาดของแทนขัดกระดาษทราย เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการเจียร์ในชิ้นงานที่มีรูปร่างจำเพาะ รวมไปถึงการเพิ่มจำนวนแทนขัดกระดาษทรายให้สามารถใช้งานกับกระดาษทรายสายพานในความหมายที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเพิ่มขั้นตอนในการเจียร์ในที่ส่งผลต่อความละเอียดของพื้นผิวชิ้นงานมากยิ่งขึ้น
- การติดตั้งและสถานที่ปฏิบัติงาน สามารถพัฒนาโดยจัดสถานที่ทำการทดลองมีความเหมาะสมกับการทำโครงการมากขึ้น เป็นพื้นที่โล่งให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในส่วนของการติดตั้งแทนขัดกระดาษทรายควรติดตั้งให้มีความแข็งเกร็งเพื่อให้มีอิฐหุ่นยนต์ทำการเจียร์ในแทนขัดกระดาษทราย

สามารถรับแรงที่ส่งจากหุ่นยนต์ได้อย่างมั่นคงไม่เคลื่อนที่ขณะปฏิบัติงาน ซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์จากการเจียร์ในคาดเคลื่อนได้

2. ด้านอุปกรณ์ซอฟแวร์

- โปรแกรม CAM เนื่องจากการพัฒนาในตัวแท่นขัดกระดาษทรายให้มีหลากหลายขนาดที่เหมาะสมต่อชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้โปรแกรม CAM สามารถเข้าถึงอุปกรณ์และวิธีการกัดชิ้นงานได้หลากหลายมากขึ้น ทำให้มีทางเลือกในการออกแบบเส้นทางการกัดชิ้นงานให้เหมาะสมมากขึ้น ทำให้การเจียร์ในมีความแม่นยำในด้านสัดส่วนของชิ้นงานมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพัฒนาได้โดยการซื้อลิขสิทธิ์ Post-processor ของเครื่อง CNC ในหลากหลายรูปแบบการควบคุม(นอกเหนือจาก 5-axis รูปแบบ X Y Z B C) เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก G-code มีลักษณะแตกต่างกันออกไป อาจทำให้สามารถแปลงข้อมูลสู่แกนอ้างอิงของหุ่นยนต์ได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น
- โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์(RoboDK และ Roboguide) สามารถซื้อลิขสิทธิ์การเข้าถึงโปรแกรมสำหรับการใช้งานในระยะยาว ทำให้เข้าถึงอุปกรณ์อำนวยความสะดวกและเข้าถึงฟังก์ชันต่างๆในโปรแกรมเพิ่มเติม เพื่อความสะดวกในการระบุตำแหน่งหรือการควบคุมหุ่นยนต์มากยิ่งขึ้น

3. แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

- สามารถปรับเปลี่ยนแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้มีความทันสมัยมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ทำโครงงานนี้มีอายุการใช้งานสูง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ส่งผลต่อความคาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่และการเจียร์ในชิ้นงาน แม้จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการรีเซ็ตจุดเริ่มต้นของหุ่นยนต์แต่ก็ยังเหลือความคาดเคลื่อนในแต่ละข้อต่อเนื่องกันอยู่ด้วย แต่การที่หุ่นยนต์รุ่นใหม่ยังง่ายต่อการควบคุม โปรแกรมที่ใช้งานเข้าถึงได้ง่ายและสามารถเลือกซื้อหุ่นยนต์ที่มี Degree of freedom สูงขึ้นได้ หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่อิสระมากยิ่งขึ้นลดข้อจำกัดในด้านข้อต่อของหุ่นยนต์สำหรับท่าทางการเจียร์ใน ทำให้การเจียร์ในชิ้นงานสะดวกและราบรื่นมากยิ่งขึ้น

อ้างอิง

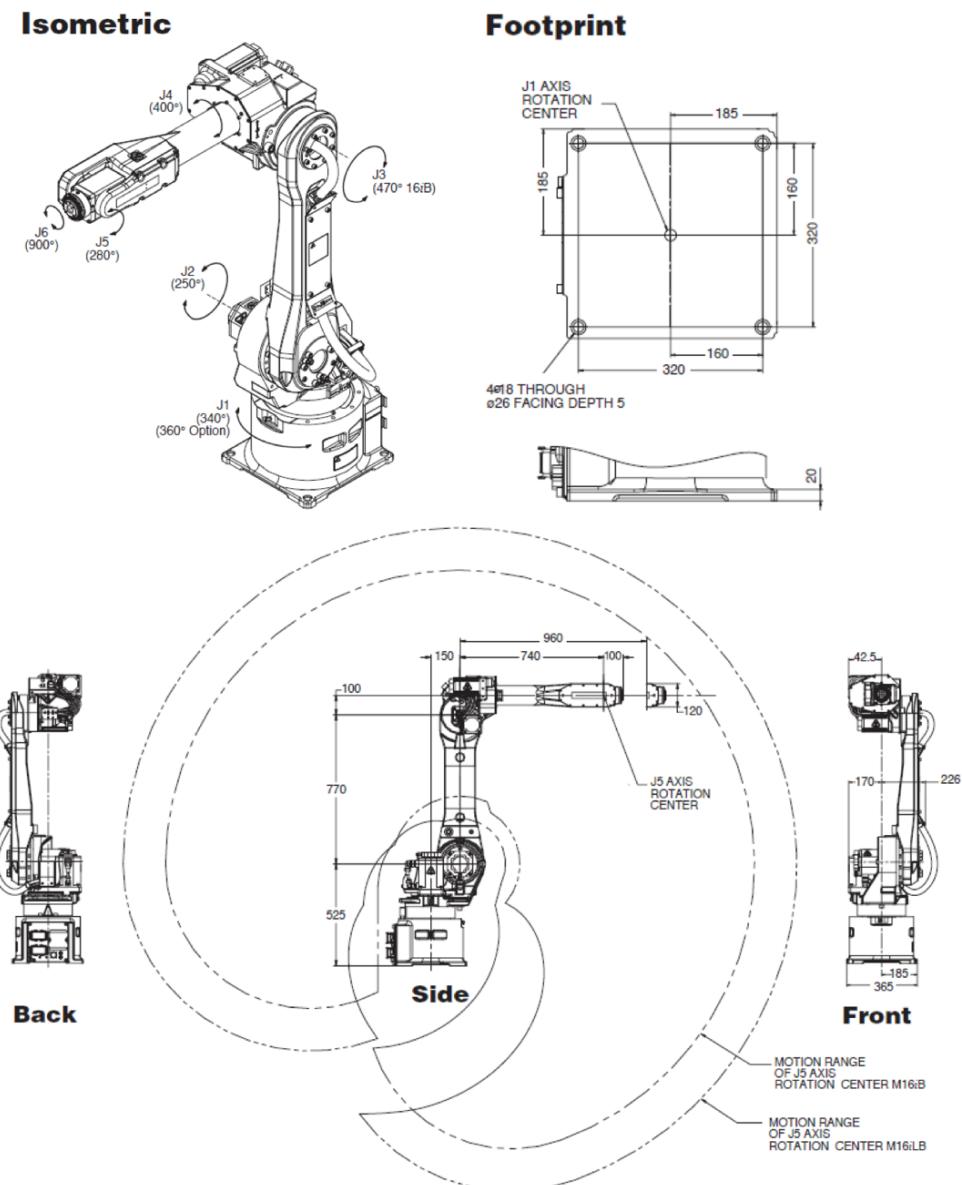
- [1] C Tournier, C labassene, A Guiot, Y Quinsat. Grinding of medical implants in cobalt-chromium alloy. Laboratory for Automated Production Research, ปี 2556
- [2] ນັກ ສູງສິບີ່ທີ່, ນັກ ຢົນການຕໍ່ສຸວະຮັນປາລ, ປຽບວິວໜຶ່ງສີຍານນີ້, ປະິກທ້ ຮ ວິໄນສີ. ການພັນກະບວນການຜລິດແບບຕອບເຫັນໂດຍໃຫ້ເຂັ້ມງລ. ການວິຊາເຄຣືອງກລ ຄະວິສາກຮຽມສາສຕ່ງ ຈຸ່າລັງກຣລົມ ທາວິທຍາລຍ , ປີ 2551.
- [3] ແລ້ວທີ່ມາ : FANUC robotics Perpetual Motive, M-16iB/20- iB/10L
- [4] Grinding and polishing of implants with a KUKA robot. ແລ້ວທີ່ມາ:
https://www.youtube.com/watch?v=gO_8spCu29M&t=38s
- [5] Hai-Long Xie , Jing-Rong Li. A robotic belt grinding approach based on easy-to-grind region partitioning. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou , China. ປີ 2563.
- [6] T. Zhang, J. Su. Collision-free planning algorithm of motion path for the robot belt grinding system. International Journal of Advanced Robotic Systems
- [7] W. Wei, Y. Chao. A path planning method for Robotic belt surface grinding. Robotics institute, Beihang University, China
- [8] P. Singla, D. Mortari, J. Junkins. How to avoid singularity for euler angle set
- [9] ແລ້ວທີ່ມາ: <https://robodk.com/blog/robot-euler-angles/>
- [10] L. Hong, B. Wang, X. Yang, Y. Wang, Z. lin. Offline programming method and implementation of industrial robot grinding based on VTK. Nanjing Institue of Technology, Nanjing, China
- [11]Y. Song, W. Liang, Y.Yang. A method for grinding removal control of a robot belt grind system. Tsinghua National laboratory for information and technology, Departmeny of computer science and technology, Tsinghua University, China

ภาคผนวก

(Appendix)

ภาคผนวก ก

Fanuc M16iB/20 Dimension



ตารางที่ รายละเอียดและมุมการเคลื่อนที่ของแขนกล Fanuc M16iB/20

M-16iB/iLB Specifications

Items		M-16iB/20	M-16iB/10L
Axes		6	6
Payload (kg)		20	10
Reach (mm)		1667	1885
Repeatability (mm)		±0.08	±0.10
Interference radius (mm)		310	310
Motion range (degrees)	J1	340/360	340/360
	J2	250	250
	J3	460	455
	J4	400	400
	J5	280	280
	J6	900	900
Motion speed (degrees/sec.)	J1	165	165
	J2	165	165
	J3	175	175
	J4	350	350
	J5	340	340
	J6	520	520
Wrist moment (kgf·m)	J4	4.0	2.2
	J5	4.0	2.2
	J6	2.0	1.0
Wrist inertia (kgf·cm·s ²)	J4	9.0	6.4
	J5	9.0	6.4
	J6	2.5	1.5
Mechanical brakes		All axes	All axes
Mechanical weight (kg)		215	230
Mounting method		Floor, ceiling (angle and wall - see Note 1)	
Installation environment		0 to 45	
Temperature °C			
Humidity		Normally: 75% or less Short term (within a month): 95% or less No condensation	
Vibration (m/s ²) (G)		4.9 or less (0.5G or less)	
IP Rating(s)		Body IP54 std. (IP55 optional) Wrist & J3 arm IP67	

Note 1 - J1 and J2 axis motion range will be derated.

ภาคผนวก ข

โค้ด Post processor ด้วยภาษา Python

Link: https://colab.research.google.com/drive/1a9gmlq4AXtThN_2LnBmoiC72lAVzF_mk?usp=sharing