

## การควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน ด้วยตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี

### A Three-Axis CNC Milling Machine Control by PID Controller

วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์\* อดุลย์ พัฒนภักดี และ เผชญ์ จันทร์สา

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์และวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0 2579 1111 ต่อ 2147, 2157, 1315, 1329, 1202

แฟกซ์: 0 2579 1111 ต่อ 2147 ถึง 9

E-mail: vitthaya.ph@spu.ac.th, adual.pa@spu.ac.th, pachern.ja@spu.ac.th,

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างและออกแบบระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกน ซึ่งใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและทดลองการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมแบบลูปปิด โดยการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนถูกขับเคลื่อนด้วยดีซีเซอร์โวมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร ขนาด 300 วัตต์ และมอเตอร์สำหรับกัดชิ้นงาน ขนาด 400 วัตต์ โดยมีชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละแกนแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน ภายใต้การควบคุมการเคลื่อนที่เป็นแบบลูปปิด โดยมีคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมแบบพีไอดี(PID) ซึ่งคอนโทรลเลอร์ถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ คำสั่งตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วถูกสร้างจากโปรแกรมการเคลื่อนที่ 2 รูปแบบ โดยแบบแรก ความเร่งคงที่-ความหน่วงคงที่ และแบบที่สอง ความเร่งคงที่-ความเร็วคงที่-ความหน่วงคงที่ ซึ่งค่าของความเร็วและความเร่งในการควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ จากผลการทดลองพบว่าในการควบคุมการเคลื่อนที่ภายใต้โปรแกรมคำสั่งแบบแรก สำหรับแกน X ค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่  $\pm 1.3 \text{ mm/s}^2$  แกน Y เท่ากับ  $\pm 1.5 \text{ mm/s}^2$  และแกน Z เท่ากับ  $\pm 1 \text{ mm/s}^2$  ผลการควบคุมภายใต้โปรแกรมคำสั่งแบบที่สองสำหรับแกน X ค่าที่ดีที่สุดมีความเร็วคงที่เท่ากับ  $4 \text{ mm/s}$  และความเร่งความหน่วงคงที่เป็น  $\pm 1.5 \text{ mm/s}^2$  แกน Y ค่าที่ดีที่สุดคือความเร็วคงที่เท่ากับ  $4 \text{ mm/s}$  และความเร่งความหน่วงคงที่เท่ากับ  $\pm 3 \text{ mm/s}^2$  และแกน Z ความเร็วคงที่เท่ากับ  $2 \text{ mm/s}$  และความเร่งความหน่วงคงที่เท่ากับ  $\pm 2 \text{ m/s}^2$  โดยค่าความเร็วและความเร่งที่ถูกจำกัดนี้เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วที่ไม่ได้จำลองรูปทางคณิตศาสตร์ไว้และความเสียดทานของโครงสร้างแต่ละแนวแกนที่ไม่แน่นอนรวมถึงความไวในการตอบสนองของมอเตอร์

**คำหลัก:** เครื่องกัดซีเอ็นซี การควบคุม ตัวควบคุมแบบ พีไอดี

#### Abstract

This research is about creating and designing the control system of 3 axis CNC machines, which will be used as the prototype for studies and experiment of closed-loop controller designing. The movement in 3 axis was driven by 300-watts permanent magnet DC Servo motor and 400-watts spindle motor. Each axis contains motor control set that use pulse width modulation. Under the closed-loop position control

with PID controllers, which were made from computer program. The order for the position of movement was created from 2 types of movement profiles. The first one is constant acceleration-constant retardation. The second is constant acceleration-constant velocity-constant retardation. In which the value of velocity and acceleration that are under the control can be changed. From the experiment, the control of movement by the first type of profile, for X axis the best value is equal to  $\pm 1.3 \text{ mm/s}^2$  and as for Y axis, the best value is  $\pm 1.5 \text{ mm/s}^2$  and for Z axis, the best value is  $\pm 1 \text{ mm/s}^2$ . The best results of the control under the second type of profile order for X axis occur when constant velocity is equal to 4 mm/s and constant acceleration is equal to  $\pm 1.5 \text{ mm/s}^2$ . And for Y axis, the best value is when velocity is equal to 4 mm/s and acceleration is equal to  $\pm 3 \text{ mm/s}^2$ . And for Z axis, the best value is when velocity is equal to 2 mm/s and acceleration is equal to  $\pm 2 \text{ mm/s}^2$ . The velocity and acceleration were limited because the nonlinearity of inertia that has not been simulated in the mathematics model, the uncertain of friction in each axis's structures and the speed of motor response.

**Keywords:** CNC Milling machine , control , PID controller

## 1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันมีการแข่งขันทางธุรกิจค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอะไหล่หรือชิ้นส่วนทางด้านวิศวกรรมยานยนต์และเครื่องจักรกลต่างๆซึ่งใช้ยุทธวิธีการลดต้นทุนการนำเข้าแบบถาวรเป็นการผลิตขึ้นเอง โดยทคโนโลยีการผลิตนี้เองที่ต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีความรวดเร็ว, ความถูกต้องโดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ในเชิงผลผลิตมวลรวมแล้วจะใช้เครื่องจักรดังกล่าวในการผลิตแม่พิมพ์เพื่อการฉีดหรือหล่อ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ประเทศต้องนำเข้าเครื่องจักรและอะไหล่ดังกล่าวคิดเป็นเงินตราที่ไหลออกนอกประเทศมากมายและเป็นไปแบบถาวร รัฐบาลไทยที่ประเทศยังไม่สามารถผลิตเครื่องดังกล่าวได้เอง จากเหตุผลดังกล่าวนี้เองผู้วิจัยเห็นว่าควรจะมีการวิจัยในเรื่องนี้เพื่อพัฒนาไปสู่การผลิตเครื่องดังกล่าวนี้

โดยจากข้อมูลที่ได้ค้นหาจากเว็บไซต์ของหอสมุดแห่งชาติ, ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยและเว็บไซต์สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผลการค้นหาพบว่าการวิจัยเพื่อสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซี ดังกล่าวเพื่อนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้จริงและมีประสิทธิภาพยังมี จึงได้ทำการวิจัยนี้โดยเบื้องต้นเป็นการสร้างต้นแบบเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน เพื่อการศึกษาตัวควบคุมที่เหมาะสม โดยอ้างอิงค่าความถูกต้องสูงสุดที่ได้กับความรวดเร็วในการทำงานที่เหมาะสมกับเครื่องจักรต้นแบบเป็นหลักโดยพิจารณาจากทฤษฎีการควบคุมแบบต่างๆ โดยผลที่ได้จะสามารถนำไปพัฒนาต่อในการสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบ 4 แกน ถึง 6 แกน เพื่อสามารถทำงานที่ซับซ้อนในเชิงอุตสาหกรรมได้รวมถึงการพัฒนาโปรแกรมในการสร้างคำสั่งเพื่อการควบคุมให้อยู่ในรูปแบบการใช้งานที่ง่าย

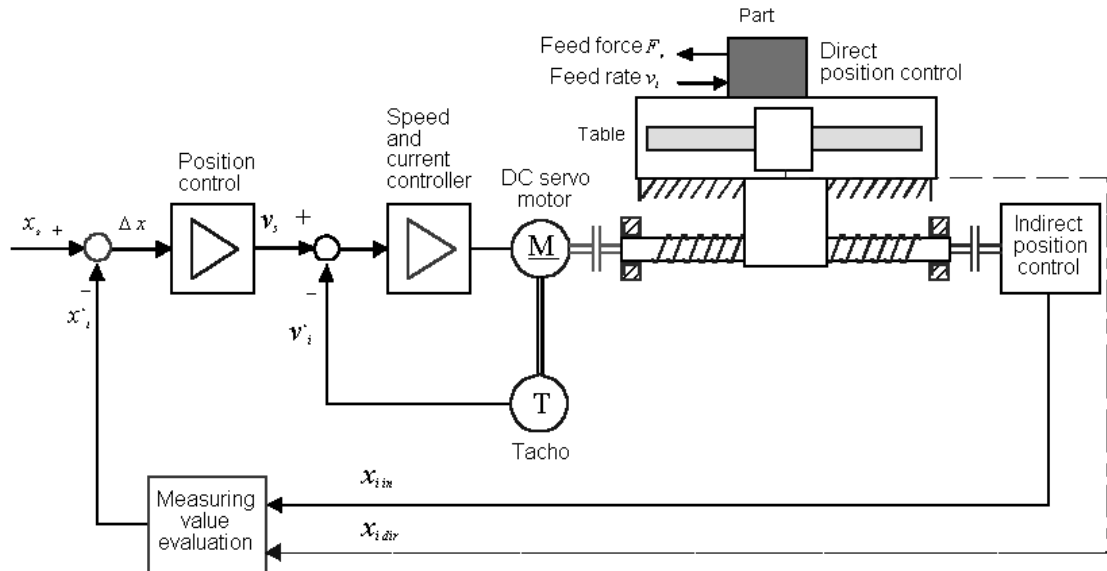
ทั้งนี้ที่ผู้วิจัยเห็นว่าเครื่องจักรดังกล่าวนี้เป็นส่วนสำคัญของการพัฒนาอุตสาหกรรมหลายด้านอาทิเช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ แม่พิมพ์ต่างๆ จึงได้ทำวิจัยโดยเลือกทำกรณีศึกษาจากเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน ที่เป็นต้นแบบจากที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปปรับใช้กับเครื่องที่สร้างใหม่หรือเครื่องเก่าที่ระบบควบคุมเดิมใช้การไม่ได้

## 2. กรอบแนวคิดและทฤษฎี

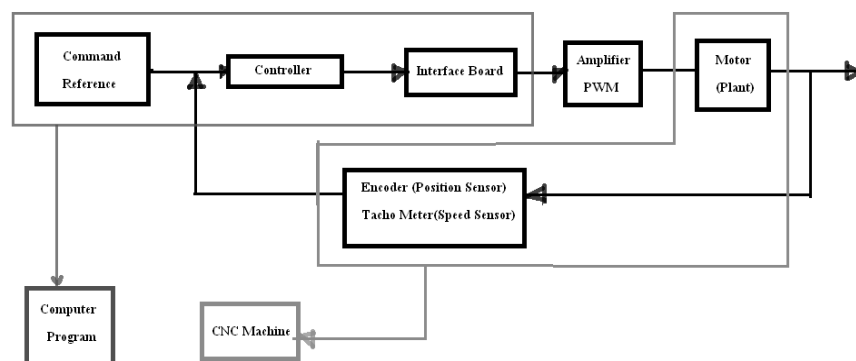
การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกน นี้มีการเคลื่อนที่และการกัดชิ้นงานโดยอาศัยกำลังขับเคลื่อนหรือการกัดชิ้นงานจากดีซีเซอร์โวมอเตอร์ ภายใต้การควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีเซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง, ความเร็วและลิมิตสวิทช์ในการกำหนดจุดอ้างอิงของแต่ละแกน

### 2.1 การควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน

การควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกนนี้ ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ(Feedback control) ในการควบคุมการทำงาน โดยระบบควบคุมการทำงานนี้จะมีส่วนในการทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด โดยข้อมูลจากเอนโคเดอร์วัดตำแหน่งและทาโคมิเตอร์วัดความเร็วที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ เพื่อพิจารณาค่าผิดพลาด ซึ่งค่าผิดพลาดจะถูกนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณการควบคุมเพื่อลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้มีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุด การควบคุมแบบป้อนกลับดังกล่าวนี้สามารถแสดงเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกน ตามรูปที่ 1

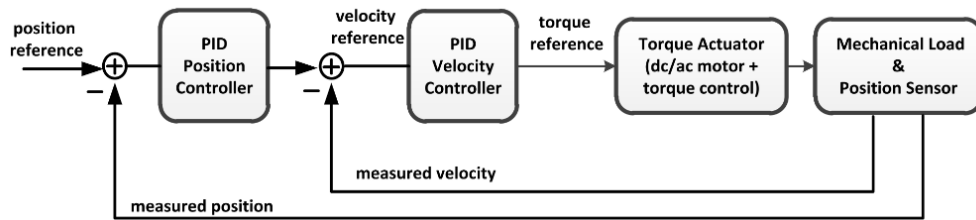


รูปที่ 1 ระบบควบคุมมอเตอร์ในเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกน



รูปที่ 2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซี

### 2.2 ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน



รูปที่ 3 การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในเครื่องกัดซีเอ็นซี

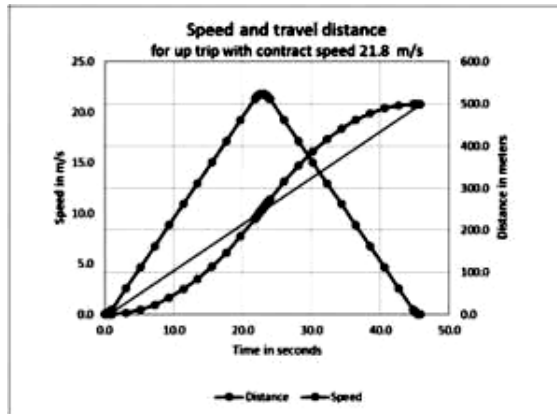
เครื่องกัดอัตโนมัติแบบ 3 แกน นี้ต้องการความถูกต้องในแต่ละแกนสูง จึงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID มาใช้ในการควบคุม ซึ่งในการควบคุมจะใช้รูปแบบตัวควบคุมในลักษณะของเวลาที่ไมต่อเนื่อง (Discrete Time) ดังนี้

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

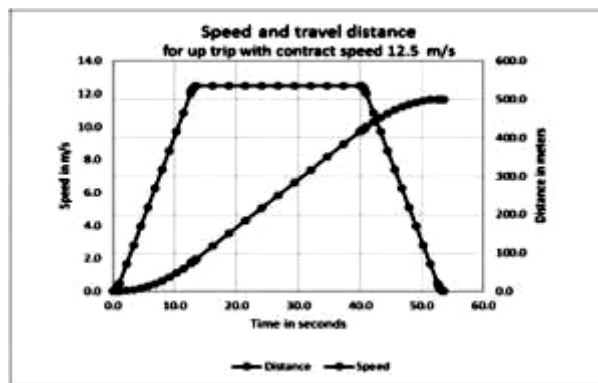
โดยสมการที่ 1 นี้ คือสมการของตัวควบคุมการทำงานที่จะใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_D$  คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมอินทิกรัลและ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ซึ่งการใช้งานของเครื่องกัดซีเอ็นซีในแต่ละเครื่อง ที่มีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกัน ในเรื่องของขนาดหรือโมเมนต์ความเฉื่อยมวลของระบบ ความเสียดทาน และขนาดมอเตอร์จะต้องทำการปรับค่าอัตราขยายเหล่านี้ เพื่อให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่ T คือ ช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล โดยในการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกนนี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มข้อมูลเป็น 100 Hz หรือ 0.01 วินาที

### 2.3 ลักษณะของค่าสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์

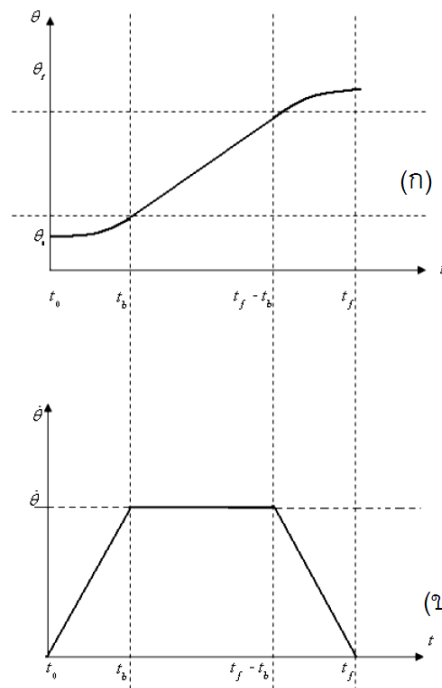
การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซี เป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ซึ่งนอกจากการคำนึงถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่แล้วยังมีการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดปลายอีกด้วย ซึ่งในเครื่องจักรซีเอ็นซีเรียกว่าอัตราการป้อน (Feed Rate) โดยการเคลื่อนที่เป็นการรับสัญญาณอ้างอิงที่ถูกส่งจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เฟซบอร์ดไปยังวงจรถับเคลื่อนแบบพัลส์วิดโมดูเลชัน เพื่อขับเคลื่อนซึ่งสัญญาณอ้างอิงมีลักษณะสัญญาณแบบพาราโบลา (Parabolic blend) และเชิงเส้น ผสมกับพาราโบลา (Linear function with parabolic blend) โดยลักษณะสัญญาณอ้างอิงแสดงได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ โดยการเคลื่อนที่ในแบบพาราโบลา ในขณะเริ่มต้นเริ่มเคลื่อนจากความเร็วเป็นศูนย์แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นในลักษณะอัตราเร่งคงที่จนถึงตำแหน่งระหว่างกลางของตำแหน่งอ้างอิงจะค่อยๆลดความเร็วกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ และสำหรับแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลาในขณะเริ่มต้นความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในแบบอัตราเร่งคงที่และที่ระหว่างกลางของตำแหน่งอ้างอิงความเร็วจะคงที่และเมื่อใกล้ตำแหน่งอ้างอิงความเร็วจะค่อยๆลดลงแบบอัตราหน่วงคงที่จนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ มีผลทำให้การเคลื่อนที่ทั้งสองรูปแบบมีความราบเรียบและนุ่มนวล



รูปที่ 4 สัญญาณแบบพาราโบลา



รูปที่ 5 สัญญาณแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลา



รูปที่ 6 แบบตัวอย่างความสัมพันธ์ของตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการสร้างสัญญาณอ้างอิงการเคลื่อนที่จำเป็นต้องรู้ค่าต่างๆ ดังนี้

$\theta_0$  ตำแหน่งเริ่มต้นที่เริ่มจะเคลื่อนที่

$\theta_f$  ตำแหน่งเป้าหมายของการเคลื่อนที่

$t_f$  ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด

ค่าทั้งสามนี้ เป็นค่าที่ต้องกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้สั่งการเคลื่อนที่ โดยค่าเหล่านี้จะนำไปใช้หาค่าอื่นๆ เพื่อการสร้างสัญญาณส่งออก ดังนี้

$$\text{หาค่าความเร่งเชิงมุมจาก} \quad \ddot{\theta} = \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2} + 1 \quad (2)$$

$$\text{หาค่า } t_b \text{ จาก} \quad t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}^2 t^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}} \quad (3)$$

$$\text{หาค่า } \dot{\theta} \text{ จาก} \quad \dot{\theta} = \ddot{\theta} t_b \quad (4)$$

สมการที่ใช้สร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่คือ

**ช่วงที่ 1 ( $t_0 \rightarrow t_b$ )**

หาสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + 0.5\ddot{\theta} t^2 \quad (5)$$

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

หาสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) \quad (6)$$

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

หาสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้จากสมการ

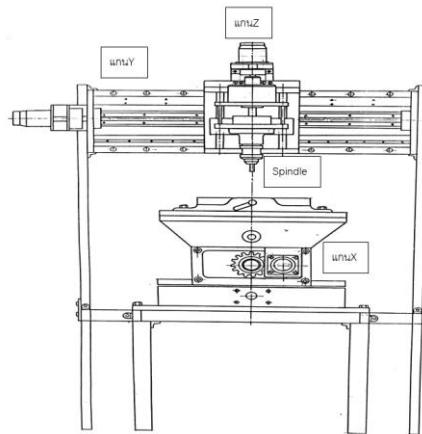
$$\theta = \theta_0 - 0.5\ddot{\theta}(t^2 - (t_f - t_b)^2) + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + \ddot{\theta} t(t_f - t_b) \quad (7)$$

### 3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

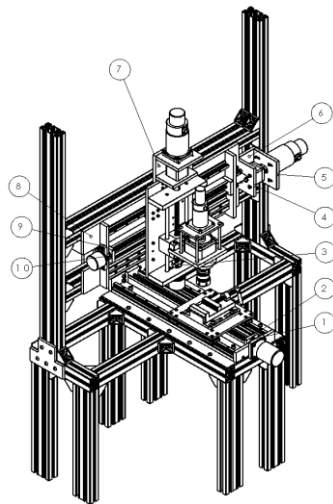
- 3.1 ออกแบบและสร้างโครงสร้างเครื่องกักแบบ 3 แกน
- 3.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุม
- 3.3 ทดสอบผลการควบคุมภายใต้คอนโทรลเลอร์แบบต่างๆ

### 4. วิธีการดำเนินวิจัย

- 4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องกัก ซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน



รูปที่ 7 แบบด้านหน้าของเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน



รายการที่	ชื่อชิ้นงาน
1	มอเตอร์แกนX
2	กล่องเกียร์สำหรับมอเตอร์แกนX
3	มอเตอร์หัวกัดขึ้นกัน
4	กล่องเกียร์มอเตอร์แกนY
5	มอเตอร์แกนY
6	โครงสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซี
7	มอเตอร์และกล่องเกียร์แกนZ
8	ลักษณะ โครงสร้างระบบขับเคลื่อนแต่ละแกน
9	ลิเนียร์ไกด์และบอลสกรู
10	เอ็นโค้ดเดอร์

รูปที่ 8 แบบภาพรวมของเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน



รูปที่ 9 ภาพรวมของเครื่องกัดซีเอ็นซี ชนิด 3 แกน

ขนาดมิติการกัดชิ้นงาน ของแกน x-y-z คือ 400 mm x400 mm x300 mm ลิเนียร์สกรูแต่ละแกนมีระยะลีด 2 mm โครงสร้างทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ โดยมอเตอร์ขับเคลื่อนแต่ละแกนเป็นดีซีเซอร์โวที่มีขนาดกำลัง 400 watt อัตราเร็วรอบสูงสุด 3000 RPM แรงบิดสูงสุด 8 N m มอเตอร์สำหรับหัวกัดชิ้นงานขนาดกำลัง 500 watt อัตราเร็วรอบสูงสุด 4000 RPM แรงบิดสูงสุด 11.8 N m เอนโค้ดเดอร์ 1024 ppr

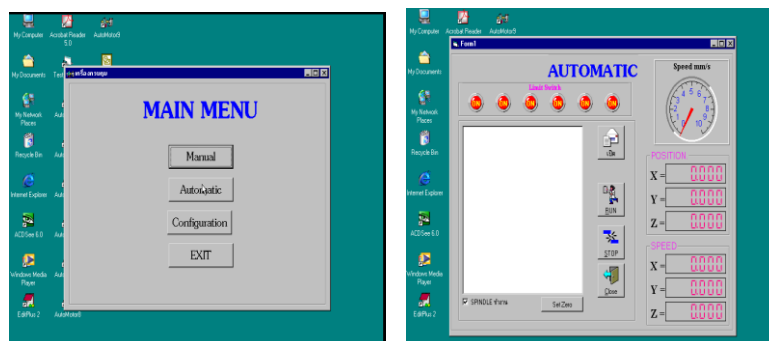
#### 4.2 อุปกรณ์และการทดลอง

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกัดซีเอ็นซีชนิด 3 แกน
2. คอมพิวเตอร์พีซี
3. โปรแกรมสร้างทางเดินและการควบคุม
4. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวแบบ PWM
5. อินเตอร์เฟซบอร์ด D/A,A/D,Digital I/O 12 บิต
6. ปากกาจับชิ้นงาน
7. ชิ้นงานทดสอบ
8. เวอร์เนียร์

##### วิธีการทดสอบ

1. ทำการเปิดสวิต POWER ON ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และคอมพิวเตอร์
2. ทำการเปิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องกัด
3. เลือกโหมด Manual เพื่อทำการเชื่อมต่อของแกนทั้งสาม
4. ไปที่โปรแกรมกำหนดค่าตัวควบคุมพีไอดี และค่าโปรไฟล์ในการสร้างตำแหน่งอ้างอิงการเคลื่อนที่โดยอ้างอิงกับค่าทางเดิน ในการกัดชิ้นงาน ในรูปแบบข้อมูลเอ็นซี แบบเอ็ม โคลด์และจี โคลด์ ตามมาตรฐานสากล
5. ทำการเลือกโหมด Automatic Run ตามคำสั่งทางเดินที่กำหนด เพื่อกัดชิ้นงาน
6. ทำการวัดขนาดของส่วนต่างๆ ที่ได้และบันทึกผลในตาราง



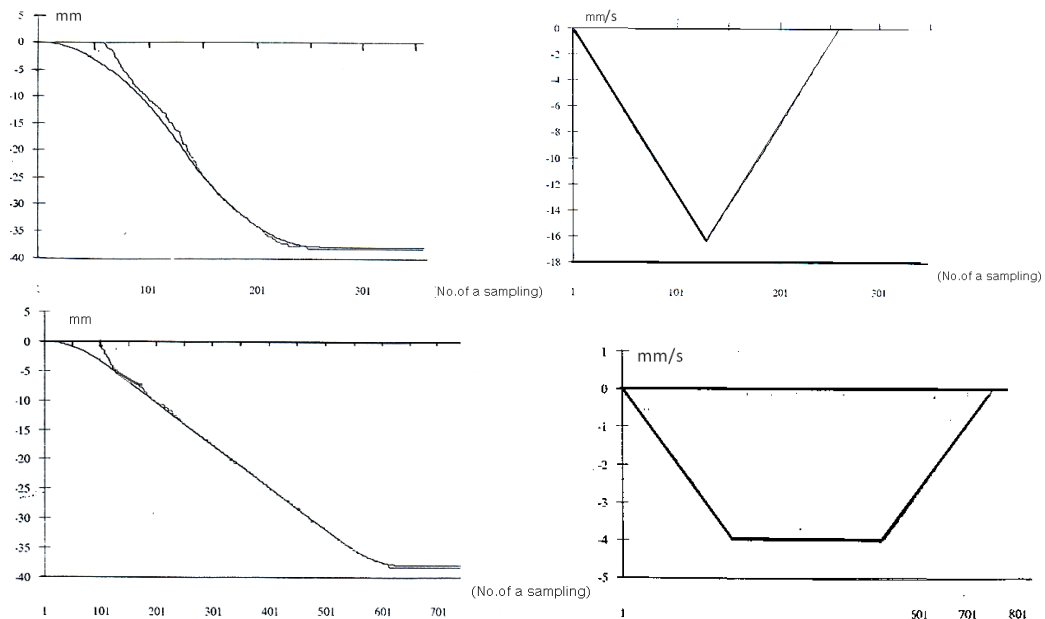
รูปที่10 ภาพรวมของขั้นตอนการทดลอง





รูปที่10 ภาพรวมของขั้นตอนการทดลอง(ต่อ)

### 4.3 ผลการทดลอง

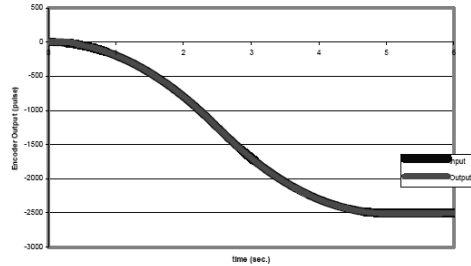


รูปที่11 ตัวอย่างผลการทดลองที่คำสั่งการควบคุมเป็นแบบ ความเร่ง-ความหน่วงคงที่ และแบบ ความเร่งคงที่-ความเร็วคงที่-ความหน่วงคงที่

### 5. ผลการวิเคราะห์

พบว่าที่อัตราขยายของตัวควบคุมของแต่ละแกนในการเคลื่อนที่กีดชิ้นงาน ที่ให้ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ๆ ดีและความคลาดเคลื่อนทุกครั้งเข้าใกล้ค่าศูนย์ ค่าของแต่ละแกนมีดังนี้ สำหรับแกน X ที่  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.002$ , แกน Y ที่  $K_p = 0.002$ ,  $K_i = 0.05$  และ  $K_d = 0.001$  และแกน Z ที่  $K_p = 0.1$ ,  $K_i = 0.4$

และ  $K_d = 0.001$  จะได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่12 โดยการเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างราบเรียบตามแนวสัญญาณอ้างอิง ตลอดการเคลื่อนที่



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณตอบสนอง

## 6. อภิปรายผล

6.1 จากผลการทดสอบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบ 2 แกนครึ่ง ในการกีดชิ้นงานซึ่งมีลักษณะโปรไฟล์แบบความเร่ง-ความหน่วงคงที่ ให้ผลการควบคุมดีที่สุดที่ค่า  $\pm 1.3 \text{ mm/s}^2$  ให้ผลของความผิดพลาดที่ค่าสุดท้ายเป็นศูนย์ และในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ซึ่งมีลักษณะ โปรไฟล์เป็นแบบ ความเร่ง-ความเร็ว-ความหน่วงคงที่ของแกน X พบว่าผลการเคลื่อนที่ค่าความเร่งความหน่วงคงที่เป็น  $\pm 1.5 \text{ mm/s}^2$  และความเร็วคงที่เป็น  $4 \text{ mm/s}$  ให้ผลการควบคุมดีที่สุดที่ค่าความผิดพลาดของค่าเป้าหมายเป็นศูนย์

6.2 การทดสอบการควบคุมตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ๆ เหมาะสมพบว่าอัตราขยายของตัวควบคุมที่ ให้ผลการควบคุมที่ดีในการใช้งานสำหรับแกน X ที่  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.002$  แกน Y ที่  $K_p = 0.002$ ,  $K_i = 0.05$  และ  $K_d = 0.001$  และแกน Z ที่  $K_p = 0.1$ ,  $K_i = 0.4$  และ  $K_d = 0.001$

## 7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองควบคุมตำแหน่งและความเร็วที่ภายใต้เงื่อนไขโปรไฟล์ของความเร็วแบบต่างๆ บนทางเดินแบบ 2 มิติพบว่าที่ภายใต้ความเร็วและความเร่งสูงๆ ให้ผลควบคุมที่ไม่ดีเนื่องจาก มีค่าความผิดพลาดที่ปลายทางหรือที่ตำแหน่งเป้าหมายค่อนข้างสูงอันเป็นผลเนื่องจาก ความไม่เป็นเชิงเส้นของความเสียดทาน ผลกระทบจากแรงเฉื่อยและขีดจำกัดของความเร็วในการตอบสนองของระบบทางกลของมอเตอร์

เราสามารถลดความผิดพลาดลงได้ด้วยการเลือกเกียร์ทดแบบฮาร์โมนิกไดรฟ์ที่มีความเสียดทานต่ำและมวลต่ำจะทำให้ลดค่าความผิดพลาดจากความเสียดทานและแรงเฉื่อยลงได้

## 8. รายงานอ้างอิง

- [1].Ha, C.-W.Rew, K.-H. Kim, K.-S. Robust Zero Placement for Motion Control of Lightly Damped Systems. IEEE Trans. Ind. Electron. 2013, 60, 3857–3864.
- [2].Hong-Jun Heo , Yungdeug Son , Jang-Mok Kim. A Trapezoidal Velocity Profile Generator for Position Control Using a Feedback Strategy.In Proceeding of Energies.2019,12,1222.
- [3]ทศพิช วิสุมิตนนท์, พิเชฐ ตรีการชัยศิริ, เกียรติกร ไวยกาญจน์.การสร้างเครื่องกัด CNC ขนาดเล็กสำหรับการผลิตแบบหล่อโฟมหลายแบบแยกชิ้น. การประชุมวิชาการฯงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม .2555.
- [4]วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ.การควบคุมระบบพลศาสตร์ . กรุงเทพมหานคร .จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .2538.
- [5]John G.Bollinger , Neil A.Duffie. Computer Control of Machines and Processes.Addison-Wesley ,1988.