

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2008, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, ปทุมธานี, ประเทศไทย

โปรแกรมแปลรหัสเอ็นซีสำหรับแขนกลแบบขนานในตระกูล H-4 กับโต๊ะหมุน รวมเป็น 5 แกน

NC Code Interpreter for A 5-Axis H-4 Family Parallel Manipulator with A Rolling Table

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ปิยะบุตร งามขมาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889

E-Mail: viboon.s@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแปลเอ็นซีโค้ด (NC-Code) ซึ่งเป็นรหัสคำสั่งที่ป้อนให้กับเครื่องจักรซีเอ็นซีที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการฯ โดยโปรแกรมพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio .NET 2008 บนระบบปฏิบัติการ Windows XP ระบบที่ได้พัฒนาขึ้นประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ประมวลผล และโปรแกรมตัวแปลภาษาเพื่อแปลรหัสคำสั่งที่อยู่ในรูปเท็กซ์ไฟล์ (Text file) โดยมีการสร้างเส้นทางเดินแบบเส้นตรง (Linear Interpolation) และควบคุมแขนกลแบบขนานในตระกูล H-4 กับโต๊ะหมุนรวมเป็น 5 แกน โดยสื่อสารผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซแอนาโลคและ D/A เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล คำหลัก ซีเอ็นซี, เอ็นซีโค้ด, ตัวแปลภาษา

Abstract

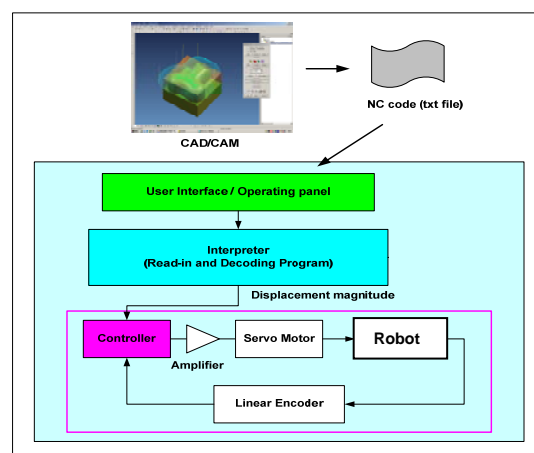
This paper is to develop a software for converting standard NC-code file for controlling a 5-axis machine developed in-house. The program is developed in Microsoft Visual Studio .NET 2008 on Windows XP. The system consists of a personal computer and the software for converting the CNC code in text format file. The software can generate paths with linear interpolation from data points. The controller module in the software will use the generated paths for controlling the motion of the 4-axis with H4 parallel mechanism and a 1-axis rolling table via counter and D/A interface card.

Keywords: Computer Numerical Control (CNC), NC-code, 5-axis, H-4 parallel mechanism

1. บทนำ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรม ซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติที่นิยมใช้ในระบบการผลิต เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยเครื่องจักรซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรที่มีคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน ระบบควบคุมซึ่งออกแบบมาใช้ร่วมกับเครื่องจักรมีราคาสูง จึงทำให้มีแนวคิดการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมาควบคุมเครื่องจักรแทนระบบควบคุมแบบเดิม เพื่อความคล่องตัวในการใช้งาน และสามารถพัฒนาโปรแกรมให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สามารถสร้างโปรแกรมขึ้นมาใช้งานเอง สามารถเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ง่าย ซึ่งในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีความสามารถสูง และแนวโน้มราคาถูกลง การควบคุมเครื่องจักรด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจึงเป็นอีกทางเลือกที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนชุดควบคุมการทำงาน

บทความฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นระบบส่วนหนึ่งของตัวควบคุมซีเอ็นซี ให้ชื่อโปรแกรมว่า G-Code Interpreter 2008 โดยโปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio .NET 2008



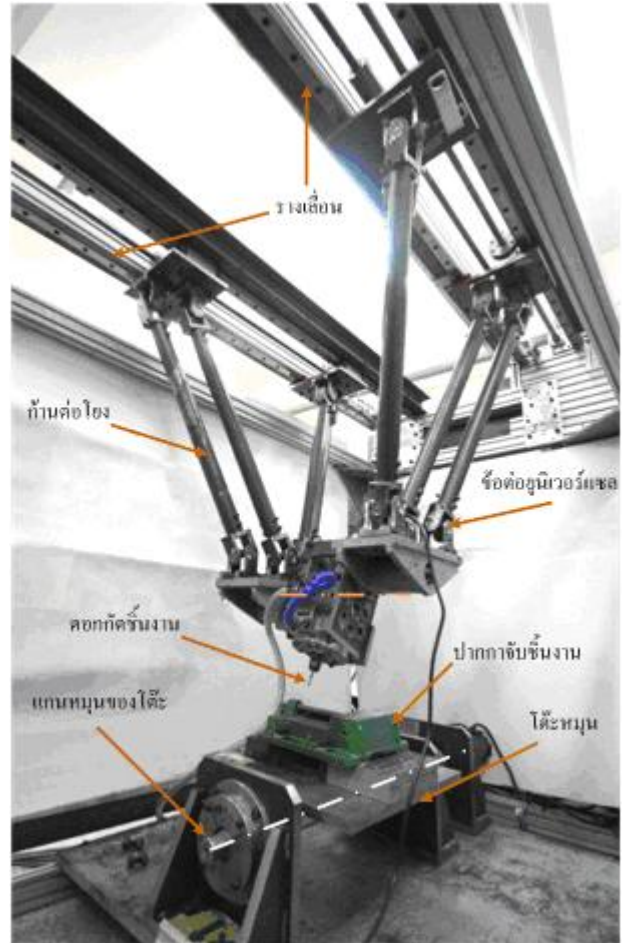
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของโปรแกรม

โดยโปรแกรมสามารถแบ่งได้ 4 ส่วนคือ

1. ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) เป็นส่วนที่ผู้ใช้ติดต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่านทางหน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. ส่วนการแปลเอ็นซีโค้ด เป็นส่วนที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลเอ็นซีโค้ดจากแฟ้มข้อมูลแบบ Text แล้วทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบคำสั่งที่พร้อมนำมาใช้ควบคุม
3. ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในส่วนนี้มีหน้าที่ในการเชื่อมต่อการดีนเดอร์เฟสเอนโคเดอร์ และ D/A และทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะเอ็กซ์วายแซด
4. ส่วนการจัดการดำเนินงาน เป็นส่วนที่ประสานการติดต่อระหว่างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ กับส่วนการแปลเอ็นซีโค้ด ส่วนการควบคุม และส่วนการจำลองการเคลื่อนที่



รูปที่ 2 รายละเอียดของแขนกลแบบเอช 4



รูปที่ 3 รายละเอียดของแขนกลแบบเอช 4 ที่ปรับปรุงใหม่

ในส่วนของแขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบและพัฒนาโดย Sangveraphunsiri, V., และ Tantawiroon, N. [4],[5],[6]. โดยในตอนแรกเป็นแขนกลแบบขนาน 4 องศาอิสระ วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียมทั้งหมดดังรูปที่ 2 เพื่อให้แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4 มีความสามารถในการกัดเซาะชิ้นงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จึงมีการปรับปรุง โดยการเพิ่มจำนวนองศาอิสระเป็น 5 องศาอิสระ โดยองศาอิสระที่เพิ่มขึ้นจะทำหน้าที่เป็นโต๊ะหมุนซึ่งสามารถจับยึดชิ้นงานที่จะทำการกัดเซาะ และสามารถหมุนได้ 90 องศาโดยมีลักษณะและรูปแบบดังในรูปที่ 3 นอกจากนั้นโครงสร้างของแขนกลที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้เปลี่ยนมาใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักจากเดิมที่ใช้อลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น ข้อต่อแบบหมุนที่ใช้มีการประกอบแบบสวมอัดเพื่อป้องกันความหลวมที่อาจจะเกิดขึ้น ส่วนข้อต่ออูนิเวอร์แซล (Universal joint) ซึ่งมีสององศาอิสระดังรูปที่ 3 เป็นข้อต่อที่ใช้กับเพลาลูกของรถยนต์จึงมีความแข็งแรงและมีความหลวมหรือระยะคลอนน้อยมาก

2.การออกแบบส่วนการแปลเอ็นซีโค้ด

เมื่อพิจารณารูปแบบคำสั่งของเอ็นซีโค้ด จากแฟ้มข้อมูลในรูปแบบเท็กซ์ไฟล์ สามารถจำแนกข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เป็นคำสั่ง (Command) และกลุ่มที่เป็นตัวแปร (Parameter) ของคำสั่งซึ่งตามหลัง

กลุ่มคำสั่ง โดยทั้งสองกลุ่มประกอบไปด้วยตัวอักษร (Key) แล้วตามด้วยค่าที่เป็นตัวเลข (Value) โดยตัวอักษรแสดงชนิดของคำสั่งหรือชนิดของตัวแปร ส่วนค่าที่เป็นตัวเลขเป็นตัวกำหนดค่าของคำสั่งที่ใช้หรือเป็นค่าของตัวแปร ยกตัวอย่างเช่น

G01 X100. Y100. Z100. F1000 ซึ่งเป็นคำสั่งการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง G01 เป็นคำสั่ง ส่วน X100. Y100. Z100. F1000 เป็นตัวแปรที่เป็นส่วนประกอบของคำสั่ง

ในการแปลงคำสั่งเอ็นซีโค้ด จากแฟ้มข้อมูลแบบเท็กซ์ไฟล์ เริ่มจากการอ่านชุดของตัวอักษรเข้ามาเพื่อแปลทีละหนึ่งบรรทัด จากนั้นจะเปรียบเทียบตัวอักษรในบรรทัดนั้นทีละตัว ว่าเป็น Command key, Command value, Parameter key หรือ Parameter value โดยที่

1. Command key เป็นกลุ่มของตัวอักษร G, M และ N
2. Parameter key เป็นกลุ่มตัวอักษร X, Y, Z, F, I, J, K, R, S เป็นต้น
3. Command value เป็นตัวเลขที่ตามหลัง Command key
4. Parameter value เป็นตัวเลขที่ตามหลัง Parameter key

ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลแบบ Text แล้วจะได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Command object ซึ่งประกอบไปด้วย Command key, Command value และกลุ่มของ Parameter object ซึ่ง Parameter object แต่ละตัวก็จะประกอบไปด้วย Parameter key และ Parameter value เมื่อส่วนการแปลเอ็นซีโค้ดทำการแปลงข้อมูลทีละบรรทัดทีละบรรทัดเสร็จแล้ว จะส่ง Command object ที่ได้ทั้งหมดจากการแปลงไปยังส่วนควบคุมเพื่อใช้ควบคุมแขนกล แล้วจึงทำการแปลงในบรรทัดต่อไป

จากแนวคิดข้างต้นจึงนำมาสร้างเป็นโปรแกรมโดยใช้ภาษา C++ โดยสร้างเป็นคลาสขึ้นมา เป็นต้นว่า Parser class, Actuator Class, Command class และ Parameter class โดยแต่ละ คลาสจะมีหน้าที่แตกต่างกันไป Parser class ทำหน้าที่รับชื่อของแฟ้มข้อมูลแบบ Text ที่ต้องการจะแปลง แล้วอ่านข้อมูลเข้ามาทีละบรรทัด จากนั้นแปลงข้อมูลที่อ่านเข้ามาให้อยู่ในรูปของชุดคำสั่ง (Command object) แล้วทำการจับคู่ (Map) คำสั่ง กับฟังก์ชันการทำงานของ Actuator object โดย Actuator class เป็น class ต้นแบบสำหรับสร้าง Actuator object ซึ่งมีหน้าที่รับชุดคำสั่งที่อยู่ในรูป Command object ที่ได้จากการแปลงเรียบร้อยแล้ว ไปควบคุมส่วนเครื่องจักร (Hardware) ในส่วนของ Command class และ Parameter class ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลของ Command object และ Parameter object ตามลำดับ

3. เทคนิคการควบคุมการเคลื่อนที่

หัวใจสำคัญของการควบคุมการเคลื่อนที่ คือควบคุมการขยับมอเตอร์โดยอิสระจากกันด้วยความเร็วต่างกัน ในเส้นทางที่กำหนดจากจุดเริ่มต้นจนกว่าจะถึงจุดที่กำหนด โดยการหมุนแกนไปพร้อมๆ กัน

เส้นทางเดินซีเอ็นซี (CNC Interpolation) [1] เป็นตัวกำหนดเส้นทางเดินของเครื่องมือ มีหน้าที่ 2 อย่างคือ คำนวณความเร็วของเครื่องมือตามแนวแกนของแต่ละแกน ตามที่ให้อัตราป้อนมาและสร้างพิกัดตามเส้นทางเดินของโปรแกรม การสร้างเส้นทางเดินของเครื่องมือสามารถจำแนกได้ 5 แบบ คือ เส้นตรง (Linear Interpolation) เส้นโค้ง (Circular interpolation) เกลียว (Helical interpolation) พาราโบลิก

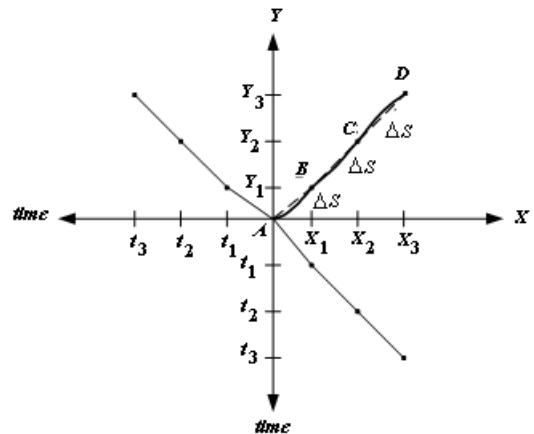
(parabolic interpolation) และลูกบาศก์ (cubic interpolation) เครื่องซีเอ็นซีส่วนใหญ่จะใช้ทางเดินแบบเส้นตรง และเส้นโค้ง

3.1 การควบคุมความเร็วตามแนวทางเดิน

ในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรซีเอ็นซีนั้น นอกจากความถูกต้องของตำแหน่งตามแนวทางแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความเร็วตามแนวทางเดินจะต้องคงที่ด้วย เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพ เทคนิคการควบคุมความเร็วให้คงที่มีหลายวิธี สำหรับในบทความนี้ ได้ใช้ทฤษฎีบางส่วนที่กล่าวไว้ในงานวิจัย [2] สำหรับการควบคุมตำแหน่งและความเร็วตามแนวทางเดิน โดยพิจารณาใน 2 มิติด้วยวิธีการดังนี้

$$Velocity = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ถ้ากำหนดให้ Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า (Sampling period) ซึ่งมีค่าคงที่ และสามารถควบคุมให้ ΔS ซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแต่ละครั้งของการสุ่มให้มีค่าคงที่ จะได้ค่าความเร็วที่มีค่าคงที่ จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้ดังนี้



รูปที่ 4 การแบ่งจุดตามแนวการเคลื่อนที่

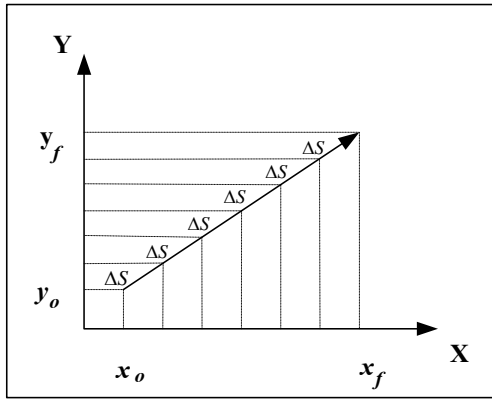
จากรูปที่ 4 เส้นทึบแสดงถึงแนวทางเดินที่ต้องการ ทำการแบ่งแนวทางเดินออกเป็นส่วนเล็กๆ มีขนาดเท่ากับ ΔS ซึ่งแสดงในรูปด้วยเส้นตรง AB BC CD (ดังแสดงเป็นเส้นประ) จากสมการที่ (1) ถ้ากำหนดให้ค่า Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า T จะสามารถหาค่า ΔS ได้ดังสมการที่ (2)

$$\Delta S = VT \quad (2)$$

เมื่อ V คือความเร็วตามแนวทางเดิน, T คือเวลาในการสุ่มค่า ΔS คือระยะทางในการเคลื่อนที่ในการสุ่มค่า 1 ครั้ง

3.2 การสร้างเส้นทางเดินแบบเส้นตรง

จากสมการที่ (2) นำค่า ΔS ที่คำนวณได้มาใช้ในการคำนวณหาจุดอ้างอิงตามแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย ที่เวลา T ใดๆ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 5 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแกน X และ Y ด้วยความเร็ว V

เมื่อพิจารณารูปที่ 5 กำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่เริ่มจากจุด x_0, y_0 เคลื่อนไปด้วยความเร็ว เป็นเส้นตรงไปยังจุด x_f, y_f สามารถหาจำนวนจุดในการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$N = \frac{\sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2}}{VT} \quad (3)$$

ระยะเคลื่อนที่แต่ละช่วงเวลาการสุ่ม ดังนี้

$$\Delta x = \frac{(x_f - x_0)}{N} \quad (4)$$

$$\Delta y = \frac{(y_f - y_0)}{N} \quad (5)$$

ชุดคำสั่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (6)$$

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y \quad (7)$$

แต่เนื่องจากหากใช้วิธีตามที่กล่าวมานั้น ช่วงเริ่มต้น และหยุดการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนจะเกิดการกระชากเนื่องจากความเฉื่อย เพื่อลดปัญหานี้จึงใช้วิธีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันสไปลน์ (Spline function) [3] โดยแบ่งเส้นทางการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกจาก t_0 ถึง t_1 เป็นช่วงความเร่งคงที่ (A) ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าที่กำหนดและเคลื่อนที่ต่อไปในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงความเร็วคงที่ (V) จนถึงเวลา t_2 จึงเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงคงที่ ($-A$) ความเร็วจะลดลงจนถึงเวลา t_3 ค่าความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งได้ระยะทางที่กำหนด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 สามารถหาระยะทาง และเวลาในแต่ละช่วงได้ดังนี้

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad (8)$$

$$\Delta s_1 = \frac{A\Delta t_1^2}{2} = x_1 - x_0 \quad (9)$$

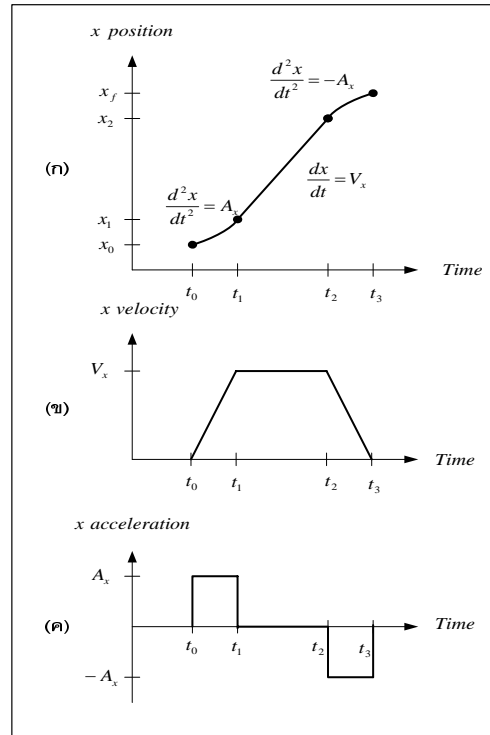
$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = \Delta t_1 \quad (10)$$

$$\Delta s_3 = \frac{V^2}{2A} = x_f - x_2 \quad (11)$$

$$\Delta s_2 = x_2 - x_1 = x_f - \Delta s_1 - \Delta s_3 \quad (12)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{\Delta s_2}{V} \quad (13)$$

เมื่อ x_0 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_0
 x_1 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_1
 x_2 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_2
 x_f เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_3



รูปที่ 6 กราฟแสดงระยะทาง ความเร็วและความเร่งกับเวลา

4 การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้

หน้าจอโปรแกรมที่ออกแบบมีลักษณะคล้ายกับโปรแกรม Notepad ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นแถบเมนูควบคุมการทำงาน (Menu Bar) ประกอบด้วยเมนู File ทำหน้าที่เกี่ยวกับการจัดการเกี่ยวกับไฟล์ข้อมูล Edit จัดการเกี่ยวกับการแก้ไขข้อความ View จัดการเกี่ยวกับการแสดงแถบทูล และไดอะล็อก และ Help ระบบช่วยเหลือ ส่วนที่สองเป็นแถบปุ่มควบคุมการทำงานของโปรแกรม (Tool Bar) เป็นแถบปุ่มสำหรับควบคุมการทำงานในการแปล และการแสดงผลการแปล และส่วนที่สามเป็นหน้าต่างเพื่อแสดง และทำการแก้ไขข้อมูลเอ็นซีโค้ด (Text Editor) ซึ่งสามารถทำการยกเลิกการแก้ไขครั้งหลังสุด ตัด คัดลอก และวางข้อความที่เลือก

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมแปลรหัสเอ็นซี และนำข้อมูลที่ได้จากการแปลนั้นมาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบขนานในตระกูล H-4 กับโต๊ะหมุนรวมเป็น 5 แกน ซึ่งเป็นพื้นฐานของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้ความกรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการถ่ายทอดความรู้และคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งโอกาสต่างๆที่ท่านให้ เพื่อฝึกฝนตัวเองและหาความรู้ทางด้านต่างๆมากมาย พร้อมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้ พร้อมกันนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกคนที่ได้ให้ข้อคิดเห็น และกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] อำนาจ ทองแสน. การเขียนโปรแกรม CNC สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์. ซีเอ็ดดูเคชั่น พ.ศ. 2544.
- [2] วันชัย ชีร์พัฒน์พร, วิบูลย์แสงวีระพันธุ์ศิริ. " A HPGL Decoding Program For A XYZ Table." การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 พ.ศ. 2540.
- [3] ธเนศ เรืองธุรกิจ, วิบูลย์แสงวีระพันธุ์ศิริ."A Digital Control Technique For 3D Contour Tracking." การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 พ.ศ. 2540.
- [4] Sangveraphunsiri, V. and Tantawiroon, N. Novel Design of a 4-DOF Parallel Robot., 2003 JSAE Annual Congress, Yokohama, Japan, May 21-23, 2003
- [5] Viboon Sangveraphunsiri, and Natdanai Tantawiroon, Design of the new 4-DOF Parallel Manipulator with Object Contact Force Control, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 19, October 19-21, 2005, Thailand.
- [6] Natdanai Tantawiroon, Viboon Sangveraphunsiri, Novel Design and Analysis of the H-4 Family Parallel Robot, Thammasat International Journal of Science and Technology, Vol 3, 2548.