

โปรแกรมถอดรหัสเอชพีจีแอลสำหรับโต๊ะเอ็กซ์วาย

เชด

A HPGL DECODING PROGRAM FOR A XYZ

TABLE

วันชัย อีรพัฒน์พร

ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

รองศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเอาไมโครคอมพิวเตอร์ มาใช้ในการควบคุมโต๊ะเอ็กซ์วายเชดที่สร้างขึ้นที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนกลับ โดยโปรแกรมจะรับข้อมูลการพิมพ์ที่อยู่ในรหัสเอชพีจีแอล เช่นแฟ้มข้อมูลการพิมพ์ (plot file) ที่ได้จากโปรแกรมมอดัลแอด และเปลี่ยนให้เป็นค่าพิกัดตำแหน่งสำหรับเป็นสัญญาณควบคุมโต๊ะเอ็กซ์วายเชดที่สร้างขึ้น

การเคลื่อนที่ของโต๊ะเอ็กซ์วายเชดนั้น แต่ละแกนการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วจะเป็นการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. (proportional + integral + derivative control) จากผลการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวทางเดิน ในช่วงความเร็วตามแนวทางเดิน 5 มิลลิเมตร/วินาที พบว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่า 0.61 มิลลิเมตร ในแนวแกนเอ็กซ์ และ 0.92 มิลลิเมตร ในแนวแกนวาย ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงกลม สำหรับการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 45, 75 และ 90 องศา ที่ความเร็วตามแนวทางเดิน 5 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าน้อยกว่า 1.53 มิลลิเมตร ในแนวแกนเอ็กซ์ และ 0.71 มิลลิเมตร ในแนวแกนวาย ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนใหญ่เป็นผลมาจากสิ่งต่างๆ เช่น ค่าแบค แลชของชุดเฟืองทด ขนาดและน้ำหนักของแกนเชดที่มีค่ามาก ซึ่งทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนของแต่ละแกนต้องออกแรงมากเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดจากน้ำหนักของแกนเชดที่กดลงบนแกนเอ็กซ์และแกนวาย

The implementation of microcomputer control for a xyz table is studied in this paper. The feedback control is used for controlling the motion of the xyz table. The program will convert the the HPGL plot file format, such as the AutoCAD plot file, to the coordinates which used as the referenced command of the controller of the XYZ table.

Each axis of the XYZ table is actuated by DC servomotor. The PID (Proportional + Integral + Derivative) control is used for controlling the motion, position and velocity, of each axis.

From the experiments, it has been shown that, for the circular path motion of 5 mm/sec., the position error are 0.61 millimeter and 0.92 millimeter for x and y direction respectively. In straight line motion of 5 mm/sec. with 45, 75 and 90 degrees sharp turn, the position error are less than 1.53 millimeters and 0.71 millimeter for x and y direction respectively. It is notified that the major effect to position error is due to backlash of the transmission gear box, inertia of the z-axis components and the friction in the X and Y direction due to the weight of the z-axis.

From the experiments, it has been shown that the position errors are 0.61 millimeter and 0.92 millimeter for x and y direction, respectively, when path velocity is 5 mm./sec. in circular path movement. In straight line motion with sharp turn 45, 75 and 90 degrees when path velocity is 5 mm./sec., it has been shown that the position error are less than 1.53 millimeters and 0.71 millimeter for x and y direction respectively. It is notified that the major effect to position error is due to backlash of the transmission gear box, dimension and weight of z-axis components which it's effect take more drive force to against friction to move x-axis and y-axis.

1) บทนำ

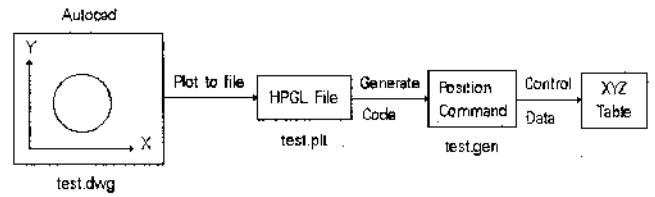
ในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในระบบควบคุมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆมากมายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อดีของการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ คือมีความแม่นยำสูงและมีความผิดพลาดน้อย เหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมคุณภาพ ในโครงการวิจัยนี้ ได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์กราฟฟิคที่เป็นที่นิยม มาเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างการผลิตงานจากคอมพิวเตอร์กับโปรแกรมชุดควบคุมการทำงานของโต๊ะเอ็กซีคิวต์แซด คือ โปรแกรม AutoCad มาประยุกต์ใช้ โดยที่เราจะเขียนโปรแกรมชุดควบคุมการทำงานของโต๊ะเอ็กซีคิวต์แซด ซึ่งมีหน้าที่แปลงรหัสจากเพิ่มข้อมูลที่เขียนแบบด้วยโปรแกรม AutoCad มาแปลงเป็นรหัสควบคุม ส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้นำโต๊ะที่เคลื่อนที่ในระบบแกนคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate) ที่เรียกว่า โต๊ะเอ็กซีคิวต์แซด (Table XYZ) มาใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบใช้ในการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานของโต๊ะเอ็กซีคิวต์แซด ที่ควบคุมการทำงานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์มีมากมาย เช่น สำหรับใช้กับงานทางด้านการตัดแก๊ส, เลเซอร์และพลาสมา (Plasma) หรือจะใช้กับงาน 3D Digitizing Table เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมนั้นมีมากมาย

สำหรับในโครงการจะใช้ประโยชน์จากรหัสภาษา HPGL (Hewlett Packard Graphics Language) ซึ่งเป็นรหัสภาษามาตรฐานของโปรแกรมเขียนแบบกราฟฟิคโดยทั่วไป โดยอาศัยการแสดงผลออกทางเครื่องพิมพ์ (Plotter) ซึ่งการสร้างแฟ้มข้อมูลที่เป็ภาษา HPGL นั้น ทำได้โดยเขียนแบบผ่านโปรแกรม AutoCad เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการบันทึกข้อมูลแบบที่วาดขึ้นนั้น ลงสู่แฟ้มข้อมูล (Plot To File) เมื่อแบบที่วาดเสร็จนั้นถูกบันทึกข้อมูลลงสู่แฟ้มข้อมูลแล้ว แฟ้มข้อมูลที่ได้จะมีโครงสร้างของรหัสภาษา HPGL ซึ่งคำสั่งต่างๆ และความหมายของรหัสโปรแกรมภาษา HPGL นั้น จะกล่าวถึงในลำดับต่อไป ซึ่งเราก็จะนำแฟ้มข้อมูลแบบที่วาดนั้นมาแปลงเป็นรหัสควบคุมส่งไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมต่อไป

2) โครงสร้างรหัสเอชพีจีแอล

2.1 รหัสภาษาเอชพีจีแอล

รหัสภาษาเอชพีจีแอล (HPGL Code) นั้น ถือว่าเป็นรหัสภาษามาตรฐานที่นิยมใช้กันในโปรแกรมวาดแบบต่างๆ (CAD Software) ย่อมาจากคำว่า Hewlett Packard Graphics Language) ซึ่งได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยที่รหัสภาษาเอชพีจีแอลต่างๆ นั้น จะมีผลต่อการสั่งการทำงานของเครื่องพิมพ์พล็อตเตอร์ ซึ่งในวิจัยนี้ เราได้ทำการปรับทิศทางแสดงผล (output re-direction) ของการแสดงผลการพิมพ์ที่ออกทางพล็อตเตอร์ให้กลับทิศทางแสดงผลทางโต๊ะเอ็กซีคิวต์แซดแทน ดังรูปแผนภาพที่ 2.1 ซึ่งจะมีประโยชน์มากกว่าและสามารถประยุกต์ไปใช้ในงานอื่นๆ ได้อีกมาก ซึ่งความหมายและตัวอย่างคำสั่งบางส่วน เป็นดังตารางที่ 2.1 ส่วนรหัสคำสั่งเอชพีจีแอลทั้งหมดดูได้จากหนังสืออ้างอิงที่ 3



รูปที่ 2.1 รูปแผนผังการส่งถ่ายข้อมูลไปยังโต๊ะเอ็กซีคิวต์แซด

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างคำสั่งภาษา HPGL (HPGL Command)

คำสั่ง (Command)	รูปแบบ (Format)	หน้าที่ (Function)
IN	Initialized IN;	เซตค่าสถานะเริ่มต้น
LT	Line Type LT n;	เลือกรูปแบบเส้นที่จะวาด
PA	Plot Absolute PA X ₁ ,Y ₁ ,X _n ,Y _n ;	เซตระบบให้การเคลื่อนที่เป็นแบบ Absolute และเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด
PD	Pen Down PD X ₁ ,Y ₁ ,X _n ,Y _n ;	เลื่อนปากกาลงและเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด
PU	Pen Up PU X ₁ ,Y ₁ ,X _n ,Y _n ;	เลื่อนปากกาขึ้นและเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด
SC	Scale SC X _{min} ,X _{max} ,Y _{min} ,Y _{max} ;	การยกเลิกค่าที่ตั้งไว้เดิม การกำหนดขอบเขตการทำงาน
SP	Select Pen SP; SP n;	การเก็บปากกา การเลือกปากกาคำที่ n
VS	Velocity VS s; Select	การกำหนดความเร็วของปากกาในการเคลื่อนที่ s mm/sec.

2.2 โครงสร้างของรหัสภาษาเอชพีจีแอล

โครงสร้างรหัสภาษาเอชพีจีแอลนั้น เมื่อได้ทำการศึกษาจากโปรแกรมวาดแบบตัวอย่าง คือ โปรแกรมออโต้แคด (AutoCad) ซึ่งอ้างอิงกับเครื่องพิมพ์พล็อตเตอร์ยี่ห้อ HP (Hewlett Packard) รุ่น 7475 นั้น จะพบว่า การเรียงลำดับคำสั่งนั้น จะเป็นไปตามลำดับขั้นตอนการวาดแบบบนโปรแกรมออโต้แคด ซึ่งกล่าวโดยสรุปคือคำสั่งแต่ละคำสั่งนั้นจะถูกปิดท้ายคำสั่งด้วยเครื่องหมายพยัญชนะภาษาอังกฤษ คือ เซมิโคลอน (;) ซึ่งคำสั่งแต่ละคำสั่งนั้นจะเรียงต่อกันไปเรื่อย จนกว่าจะสิ้นสุดคำสั่ง ซึ่งตัวอย่างแฟ้มข้อมูลรหัสภาษาเอชพีจีแอล เป็นไปตามตัวอย่างในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแฟ้มข้อมูลรหัสภาษาเอชพีจีแอล

1. วาดรูปเส้นตรง ยาว 5 มม. จากจุด (0,0) ไปยังจุด (5,0)
←-(;←-.I81;;17;←-.N;19;IN;SC;PU;PU;SP;LT;VS20;PA0;0;PD;PA200;0;PU;PA0;0;SP;
2. วาดรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า ยาวด้านละ 5 มม. จากจุด (0,0) ไปยังจุด (5,0) ไปยังจุด (5,5) ไปยังจุด (0,5) กลับมาังจุด (0,0)
←-(;←-.I81;;17;←-.N;19;IN;SC;PU;PU;SP;LT;VS20;PA0;0;PD;PA200;0;PA200;200;PAC;200;PA0;0;PU;PAC;0;SP;
3. วาดรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ยาวด้านละ 5 มม. จากจุด (0,0) ไปยังจุด (5,0) ต่อไปยัง

จุดต่อไป และกลับมายังจุด (0,0)
←.←.←.181.17.←.N;19;IN;SC;PU;PU;SP1;LT;VS20;PA0,0;PD;PA200,0;PA100.173;PA0,0;PU;PAC,0;SP;
4. วาดรูปวงกลม รัศมี 3 มม. จุดศูนย์กลาง (3,3)
←.←.←.181.17.←.N;19;IN;SC;PU;PU;SP1;LT;VS20;PA240,123;PD;PA239,141;PA233,161; PA224,180;PA212,197;PA197,212;PA180,224;PA161,233; PA141,238;PA120,240;PA99,238;PA79,233;PA60,224;PA43,212;PA26,197;PA16,180; PA7,161;PA1,141;PA0,120;PA1,99;PA7,79;PA16,60;PA28,42;PA43,28; PA60,16; PA79,7;PA99,1;PA120,PA141,1;PA161,7;PA180,16;PA197,28; PA212,42; PA224,60;PA233,79;PA239,99;PA240,120;PU;PA0,0;SP;

3) การควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี.

3.1 หลักการการควบคุม (Control Laws)

หลักการทางตรรกศาสตร์ของการควบคุม (control logic elements) คือ การออกแบบเพื่อที่จะจัดการกับสัญญาณคลาดเคลื่อน (error signal) เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุม (control signal) ที่ถูกต้อง อัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อที่จะให้สัญญาณควบคุมที่ถูกต้องนั้น คือ หลักการการควบคุม (control law or control action) สัญญาณคลาดเคลื่อนที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (non-zero error signal) นั้น จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำสั่งการ (command) หรือเกิดสิ่งรบกวน (disturbance) ขึ้นกับระบบ หน้าที่หลักของตัวควบคุม (controller) คือ การควบคุมระบบให้ได้ค่าสัญญาณควบคุมที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้มากที่สุด จุดประสงค์ของการควบคุมสามารถกล่าวได้โดยสรุป คือ

3.1.1 เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะเสถียร (steady state error) ให้น้อยลงหรือหมดไป โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Integrat

3.1.2 เพื่อลดระยะเวลา (settling time) เข้าสู่สถานะเสถียรให้สั้นลง โดยออกแบบตัวควบคุมชนิดเกนสูง

3.1.3 เพื่อลดค่าการแกว่งสูงสุด (maximum overshoot) ของระบบให้มีค่าน้อยลง โดยเพิ่ม damping ให้กับระบบควบคุม

3.2 การควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Control)

แม้ว่าในกระบวนการต่างๆ โดยทั่วไป จะเป็นแบบต่อเนื่องของเวลา (continuous in time) แต่กระบวนการต่างๆ ในคอมพิวเตอร์จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ของช่วงเวลา เนื่องจากการประมวลผลและการแสดงค่าผลลัพธ์ต่างๆ นั้น ต้องอาศัยการสุ่มข้อมูล (sampling) ตามค่าสัญญาณความถี่ของเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นๆ นั่นก็เป็นเหตุผลหลักที่จะใช้ในการออกแบบโปรแกรมชุดควบคุมให้มีลักษณะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องของเวลา (discrete controller) ซึ่งสมการของตัวควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_p + (\Delta m_n)_i + (\Delta m_n)_d \quad (3-1)$$

$$(\Delta m_n)_p = m_n - m_{n-1} = K_p(e_n - e_{n-1})$$

$$(\Delta m_n)_i = m_n - m_{n-1} = K_i T e_n$$

$$(\Delta m_n)_d = m_n - m_{n-1} = \frac{K_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})$$

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_0 e_n + K_1 e_{n-1} + K_2 e_{n-2} \quad (3-2)$$

โดยที่ $m(t)$ คือ ค่าการควบคุม (manipulation value)

K_p คือ ค่าเกนควบคุมแบบ พี. (the controller proportionality constant or gain)

$e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (error value)

$$K_0 = K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \quad (3-3)$$

$$K_1 = -K_p - \frac{2K_d}{T} \quad (3-4)$$

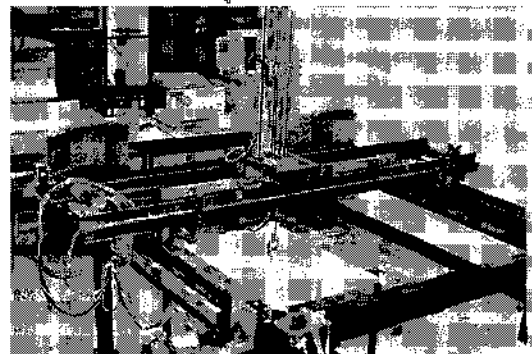
$$K_2 = \frac{K_d}{T} \quad (3-5)$$

จากสมการที่ (3-2)-(3.5) จะนำมาเขียนโปรแกรมชุดควบคุมต่อไป

4) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโต๊ะเอ็กซ์วายแซด

ในการหาค่าเกน (gain) ของตัวควบคุม (controller) จะต้องมีการทดสอบค่า เกนที่หาได้นั้น ให้ผลของการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร ซึ่งเมื่อทำการทดสอบจริง ถ้าค่าเกนที่ใช้มีค่าไม่เหมาะสม อาจทำให้ระบบเกิดสถานะไม่เสถียร (unstable) ซึ่งอาจจะนำความเสียหายมาสู่ระบบ ดังนั้น ขั้นตอนแรกของการหาค่าเกน จะใช้วิธีการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ (mathematical simulation) ระบบทั้งหมดด้วยคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบระบบควบคุมจะถือว่าความเคลื่อนที่ในแนวแกนหนึ่ง จะไม่มีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของอีกแกนหนึ่ง และสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ (ดูหนังสืออ้างอิง 1 และ 8)



รูปที่ 4.1 แสดงโต๊ะ XYZ

สมการพลศาสตร์ (Dynamic Model) ของแกนเอ็กซ์และแกนวาย คือ

$$(J_x + r^2 M_x) \ddot{x} + C_x \dot{x} = T_x r - \mu r^2 M_x g \quad (4-1)$$

$$(J_y + r^2 M_y) \ddot{y} + C_y \dot{y} = T_y r - \mu r^2 M_y g \quad (4-2)$$

กำหนดให้

F_1, F_2, F_3 คือ แรงดึงในเส้นลวดสลิง

F_T คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากแรงเสียดทานของ

ลูกปืนที่ใช้ทำลูกล้อของระบบแกน

x คือ ระยะที่มวล M เคลื่อนที่ไป

a คือ ความเร่งของมวล M

r คือ ค่ารัศมีของล้อสายพาน

T_x, T_y คือ ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ ในแนวแกนเอ็กซ์และ

แกนวาย

J_x, J_y คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อสายพานและมอเตอร์
 ในแกนเอ็กซ์และแกนวาย
 M_x, M_y คือ มวลของระบบในแกนเอ็กซ์และแกนวาย
 C_x, C_y คือ ค่าสัมประสิทธิ์วิสคัสเต็มปีงของมอเตอร์แกน
 เอ็กซ์และแกนวาย
 μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของดรัมลูกปืน

V = ความเร็วตามแนวทางเดินที่ออกแบบ
 T = เวลาในการสุ่มค่า
 ΔS = ระยะทางที่เคลื่อนที่ในการสุ่มค่า 1 ครั้ง

สมการพลศาสตร์ (Dynamic Model) ของแกนแฮต กรณีเคลื่อนที่ขึ้น
 คือ

$$\left(\frac{2\pi J}{L_e} + \frac{ML_e}{1800\pi}\right)\ddot{z} + \left(\frac{2\pi C}{L_e}\right)\dot{z} = T_m - \left(\frac{MgL_e}{1800\pi}\right) \quad (4-3)$$

สมการพลศาสตร์ (Dynamic Model) ของแกนแฮต กรณีเคลื่อนที่ลง คือ

$$\left(\frac{2\pi J}{L_e} + \frac{ML_e}{1800\pi}\right)\ddot{z} + \left(\frac{2\pi C}{L_e}\right)\dot{z} = T_m + \left(\frac{MgL_e}{1800\pi}\right) \quad (4.4)$$

กำหนดให้

- T_m คือ ค่าแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์
- T_h คือ ค่าแรงบิดที่บอลล์สกรู
- M คือ มวลของระบบ
- F คือ แรงที่ใช้ในการยกขึ้นลง
- J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบ
- C คือ ค่าสัมประสิทธิ์วิสคัสเต็มปีงของระบบ
- L_e คือ ค่าระยะลีดของบอลล์สกรู
- z คือ ระยะการเคลื่อนที่
- η คือ ค่าประสิทธิภาพในการส่งกำลังของบอลล์สกรู

5) การออกแบบตัวควบคุม

5.1 การควบคุมความเร็วตามแนวทางเดิน

ในการเคลื่อนที่ของโต๊ะเอ็กซ์วายแฮตนั้น สิ่งที่สำคัญนอกเหนือจาก
 ความถูกต้องของตำแหน่งตามแนวทางเดินแล้ว ความเร็วตามแนวทาง
 เดินจะต้องคงที่ด้วย เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพ สำหรับโครงการวิจัยนี้
 การควบคุมตำแหน่งและความเร็วตามแนวทางเดินจะเป็นดังนี้

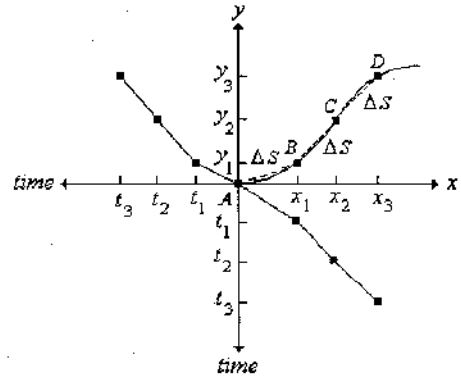
$$\text{Velocity} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (5-1)$$

จากคำจำกัดความในสมการที่ (5-1) จะเห็นได้ว่า ถ้ากำหนดให้
 Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า (sampling period) ซึ่งมีค่าคงที่ และ
 สามารถควบคุมให้ ΔS ซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแต่ละ
 ครั้งของการสุ่มให้มีค่าคงที่ เราจะได้ค่าความเร็วที่มีค่าคงที่ จากหลัก
 การดังกล่าวเราสามารถนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้
 ดังนี้

จากรูปที่ 5.1 เส้นทึบจะแสดงถึงแนวทางเดินที่ต้องการ เราจะแบ่ง
 แนวทางเดินออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่มีขนาดเท่ากับ ΔS ซึ่งแสดงใน
 รูปด้วยเส้นตรง AB BC CD (ดังแสดงด้วยเส้นประ) จากสมการที่ (5-1)
 ถ้ากำหนดให้ค่า Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า จะสามารถหาค่า
 ΔS ได้

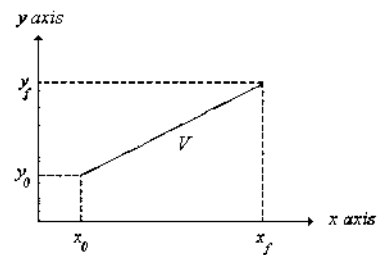
$$\Delta S = VT \quad (5-2)$$

กำหนดให้



รูปที่ 5.1 การแบ่งจุดตามแนวทางการเคลื่อนที่

จากสมการที่ (5-2) เราจะนำค่า ΔS ที่คำนวณได้ไปใช้ในการ
 คำนวณหาจุดอ้างอิงตามแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย ที่เวลา T ใดๆ เก็บ
 ไว้ก่อน ดูรูป 5.2 ประกอบ



รูปที่ 5.2 การเคลื่อนที่แบบเส้นตรงของแกนเอ็กซ์และวาย ที่ความเร็ว V

ในการสร้างแนวทางการเคลื่อนที่ ที่ได้จากโปรแกรมอัตโนมัติแค่นั้น จะใช้
 รูปแบบการสร้างแนวทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง (linear interpolation)
 ตามหลักการดังนี้

$$N = \frac{[(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2]^{1/2}}{TV} \quad (5-3)$$

ตำแหน่งต่างๆ ของทั้งแกนเอ็กซ์และวายเป็นดังนี้

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (5-4)$$

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y \quad (5-5)$$

โดยที่

$$\Delta x = \frac{(x_f - x_0)}{N} \quad (5-6)$$

$$\Delta y = \frac{(y_f - y_0)}{N} \quad (5-7)$$

โดยที่

x_0 คือ ค่าตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกนเอ็กซ์

x_f คือ ค่าตำแหน่งปลายทางในแนวแกนเอ็กซ์

y_0 คือ ค่าตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกนวาย

y_f คือ ค่าตำแหน่งปลายทางในแนวแกนวาย

T คือ คาบเวลาในการสุ่มข้อมูล

V คือ ค่าความเร็วของทางเดิน

N คือ ค่าจำนวนครั้งของการสุ่มข้อมูล

Δx คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแต่ละคาบการสุ่มในแนวแกนเอ็กซ์

Δy คือ ระยะการเคลื่อนที่ในแต่ละคาบการสุ่มในแนวแกนวาย

x_{n-1} คือ ค่าตำแหน่งที่ $n-1$ ของการสุ่มในแนวแกนเอ็กซ์

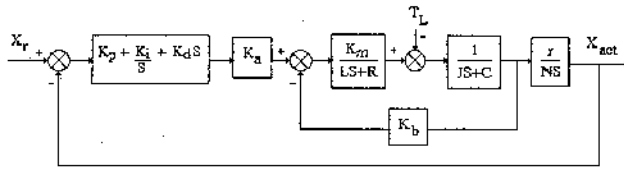
y_{n-1} คือ ค่าตำแหน่งที่ $n-1$ ของการสุ่มในแนวแกนวาย

x_n คือ ค่าตำแหน่งที่ n ของการสุ่มในแนวแกนเอ็กซ์

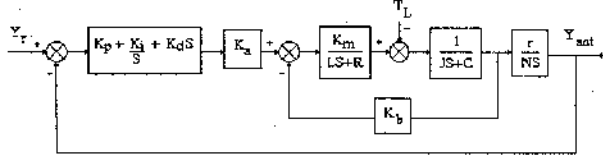
y_n คือ ค่าตำแหน่งที่ n ของการสุ่มในแนวแกนวาย

5.2.1 การออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์และแกนวาย

การออกแบบจะพิจารณาจากแผนภาพการควบคุมของระบบ ดังในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จะแสดงแผนภาพการควบคุมของระบบแกนเอ็กซ์และแกนวาย ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์



รูปที่ 5.4 แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนวาย

ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Plant's Transfer Function) ของทั้ง 2 แกนจะเหมือนกัน คือ

$$G_p(s) = \frac{K_a K_m (r/N)}{LJs^3 + (LC + RJ)s^2 + (RC + K_b K_m)s} \quad (5-12)$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 2 แกนจะเหมือนกันทุกตัว ยกเว้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพียงค่าเดียวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าดังนี้ คือ

$$C = 0.1 \text{ oz-in/krpm} = 6.7446 \times 10^{-6} \text{ N-m/(rad/s)}$$

$$K_a = 4$$

$$K_b = 5.8 \text{ V/krpm} = 5.54 \times 10^{-7} \text{ V/(rad/s)}$$

$$K_m = 7.8 \text{ oz-in/A} = 0.055 \text{ N-m/A}$$

$$L = 2.3 \text{ mH}$$

$$N = 100$$

$$r = 0.025 \text{ m}$$

$$R = 1.1 \text{ ohm}$$

$$M_x = 20.0 \text{ kg}$$

$$M_y = 12.0 \text{ kg}$$

$$J_x = M_x r^2 / N^2 = 20.0 \times 0.025^2 / 100^2 = 1.25 \times 10^{-6} \text{ kg-m}^2$$

$$J_y = M_y r^2 / N^2 = 12.0 \times 0.025^2 / 100^2 = 0.75 \times 10^{-6} \text{ kg-m}^2$$

$$J_m = 5.5 \times 10^{-3} \text{ oz-in-s}^2 = 3.89 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$

$$J_{Tx} = J_x + J_m = 4.015 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$

$$J_{Ty} = J_y + J_m = 3.965 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$

เนื่องจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแกนเอ็กซ์และแกนวายมีค่าต่างกันน้อยมาก ดังนั้นในการออกแบบ จึงใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย $J \approx 4 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$ แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (5-12) จะได้

$$G_p(s) = \frac{1}{(1.67 \times 10^{-3})s^3 + 0.8s^2 + 0.1347s} \quad (5-13)$$

โดยวิธีการของ Ziegler-Nichols โดยใช้ Ultimate Cycle Method เราจะได้ว่า

$$K_p = 0.6K_{cr} = 38.72$$

$$T_i = 0.5P_{cr} = 0.35$$

$$T_d = 0.125P_{cr} = 0.0875$$

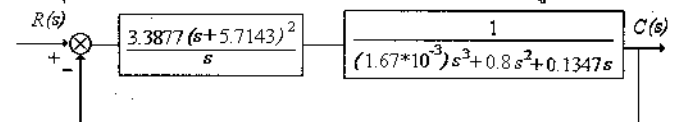
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 110.63$$

$$K_d = K_p T_d = 3.39$$

ดังนั้นเราหาฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์และแกนวายได้จากสมการที่ (5-11) คือ

$$G_c(s) = \frac{33877(s + 5.7143)^2}{s} \quad (5-14)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์และแกนวายที่หาได้ จะพบว่าชุดควบคุมจะมีโพล (pole) ที่จุดกำเนิด (origin) อยู่ 1 ค่า และซีโพอ์ อยู่ 2 ค่า ที่ตำแหน่ง $s = -5.7143$ ดังนั้นแผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์และแกนวาย จะเป็นดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนเอ็กซ์และแกนวาย

จากรูปที่ 5.5 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทั้งหมดของแกนเอ็กซ์และแกนวาย คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{33877s^2 + 38.7167s + 110.6193}{(1.67 \times 10^{-3})s^4 + 0.8s^3 + 3.5224s^2 + 38.7167s + 110.6193} \quad (5-15)$$

โดยที่

C คือ ค่าวิสคัสแดมป์ปิ้งของมอเตอร์

K_a คือ ค่าเกนขยายโวลต์เตจของแอมพลิฟายเออร์

K_b คือ ค่าโวลต์เตจย้อนกลับของมอเตอร์

K_m คือ ค่าเกนคงที่ของมอเตอร์

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดอาร์เมเจอร์

N คือ อัตราทดของชุดเฟืองทด

r คือ รัศมีของมูเลย์

R คือ ค่าความต้านทานในขดลวดอาร์เมเจอร์

M_x คือ มวลของแกนเอ็กซ์

M_y คือ มวลของแกนวาย

J_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนเอ็กซ์

J_y คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนวาย

J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

J_{Tx} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของแกนเอ็กซ์

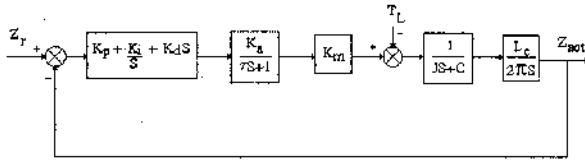
J_{Ty} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของแกนวาย

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยสูงสุดของแกนเอ็กซ์เทียบกับแกนวาย

K_{cr} คือ ค่าเกนวิกฤต

- P_{cr} คือ ค่าคาบเวลาริक्त
- ω คือ ค่าความถี่ในการสั่นของระบบ
- T_d คือ ค่าเวลาแบบดีริเฟอเรนเชียล
- T_i คือ ค่าเวลาแบบอินทิกรัล
- K_p คือ ค่าเกนแบบ พี.
- K_i คือ ค่าเกนแบบ ไอ.
- K_d คือ ค่าเกนแบบ ดี.

5.2.2 การออกแบบค่าเกนของตัวควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกน แชด



รูปที่ 5.6 แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกน แชด ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Plant's Transfer Function) ของแกน แชด คือ

$$G_p(s) = \frac{K_a K_m (L_c / 2\pi)}{\tau J s^3 + (\tau C + J) s^2 + C s} \quad (5-16)$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแกนแชดเป็นดังนี้

$$C = 0.3 \text{ oz-in/krpm} = 2.0234 \times 10^{-5} \text{ N-m/(rad/s)}$$

$$K_a = 7.68$$

$$K_m = 11.8 \text{ oz-in/A} = 0.0833 \text{ N-m/A}$$

$$L_c = 0.005 \text{ m}$$

$$\tau = 0.0015 \text{ s}$$

$$J_{screw} = Mr^2 = 0.7 \times 0.008^2 = 4.48 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$

$$J_{mt} = m \left(\frac{L_c}{2\pi} \right)^2 = 0.5 \times (0.005/2\pi)^2 = 3.1663 \times 10^{-7} \text{ kg-m}^2$$

$$J_m = 0.0078 \text{ oz-in-s}^2 = 5.51 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$$

$$J = J_{screw} + J_{mt} + J_m = 1.0022 \times 10^{-4} \text{ kg-m}^2$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (5-16) จะได้

$$G_p(s) = \frac{1}{(2.95 \times 10^{-4})s^3 + 0.20s^2 + 0.04s} \quad (5-17)$$

เราสามารถหาค่า K_p , T_i , และ T_d ของตัวควบคุม PID ได้ดังนี้

$$K_p = 0.6K_{cr} = 16.27$$

$$T_i = 0.5P_{cr} = 0.27$$

$$T_d = 0.125P_{cr} = 0.0675$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 60.26$$

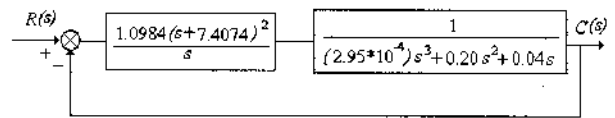
$$K_d = K_p T_d = 1.10$$

ดังนั้นเราหาฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนแชด ได้จากสมการที่ (5-11) คือ

$$G_c(s) = \frac{1.0984(s + 7.4074)^2}{s} \quad (5-18)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนแชดและ แกนวางที่หาได้ จะพบว่าชุดควบคุมจะมีโพล (pole) ที่จุดกำเนิด

(origin) อยู่ 1 ค่า และซีโร อยู่ 2 ค่า ที่ตำแหน่ง $s = -7.4074$ ดังนั้น แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนแชด จะเป็นดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนภาพการควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี. ของแกนแชด

จากรูปที่ 5.7 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบทั้งหมดของแกนแชด คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1.0984s^2 + 16.2726s + 60.2622}{(2.95 \times 10^{-4})s^3 + 0.20s^2 + 1.1384s + 16.2726s + 60.2622} \quad (5-19)$$

5.3 การออกแบบโปรแกรม (Programming Design)

ในการออกแบบโปรแกรมในงานวิจัยนี้ จะแบ่งโปรแกรมเป็น 2 โปรแกรมหลัก คือ

1. โปรแกรมถอดรหัสจากแฟ้มข้อมูลรหัสเลขพีจีแอล จากโปรแกรม ออโต้แคดมาเป็นค่าพิกัดตำแหน่งของทางเดิน
2. โปรแกรมการควบคุมการทำงานของโต๊ะเอ็กซ์ชวยแชด ซึ่งรายละเอียดเป็นดังนี้ คือ

5.3.1 การออกแบบโปรแกรมถอดรหัส

การออกแบบโปรแกรมมีขั้นตอนโดยสรุป คือ

1. การเปิดแฟ้มข้อมูลเลขพีจีแอล
2. การอ่านค่ารหัสคำสั่งทีละ 1 คำสั่ง โดยที่แต่ละคำสั่งจะค้น ด้วยเครื่องหมาย ; (เซมิโคลอน)
3. การเปรียบเทียบรหัสว่าเป็นคำสั่งใด ให้ทำสิ่งใด การแบ่งจุด บนทางเดิน จะใช้สมการที่ (5-3), (5-4), (5-5), (5-6) และ (5-7) ประกอบ กัน

4. บันทึกค่าพิกัดตำแหน่งบนทางเดินที่ได้จากการคำนวณลง บนแฟ้มข้อมูลปลายทาง

5. ตรวจสอบการสิ้นสุดคำสั่งในแฟ้มข้อมูล ถ้าจริงให้หยุดการทำงาน ถ้ายังไม่สิ้นสุดคำสั่ง ให้ทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกว่าจะสิ้นสุด คำสั่ง ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว สามารถเขียนเป็นแผนผังการทำงาน ได้ดังรูปที่ 5.8

5.3.2 การออกแบบโปรแกรมชุดควบคุม

การออกแบบโปรแกรมมีขั้นตอนโดยสรุป คือ

1. เปิดแฟ้มข้อมูลตำแหน่งพิกัดทางเดิน อ่านค่าอ้างอิงเข้ามาที ละ 1 คำสั่ง
2. รับรู้ค่าตำแหน่งจริง เพื่อคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน ตามค่าคาบเวลาที่กำหนด
3. คำนวณค่าการควบคุมของแกน X แกน Y และแกน Z จาก ตัวควบคุมแบบ PID
4. ส่งค่าสัญญาณควบคุมออกไป
5. อัปเดตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

6. ตรวจสอบการสิ้นสุดของแฟ้มข้อมูล ถ้าสิ้นสุดให้หยุดการทำงาน ถ้ายังไม่ให้ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 6 ไปจนสิ้นสุดแฟ้มข้อมูล นั้น ๆ

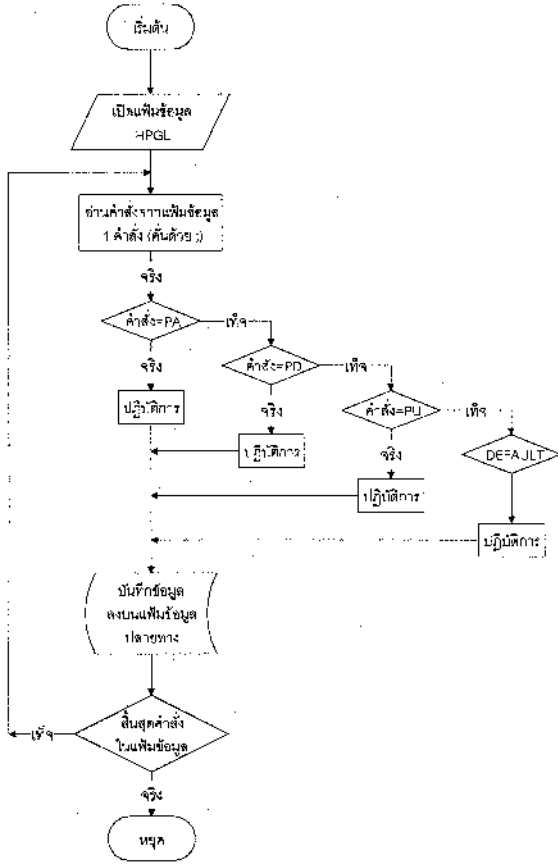
6) การทดลอง

6.1 การทดสอบทางเดินของแบบร่าง

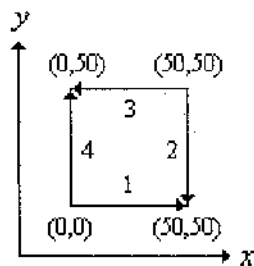
ในการทดสอบทางเดินของแบบร่างนั้น ตามโปรแกรม Autocad ได้แบ่งการพล็อตจุดทางเดินออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบไม่มีการรวบรัดเส้นทางเดิน (No Optimization)
2. แบบมีการรวบรัดเส้นทางเดิน (Optimization)

ซึ่งในการทดสอบ เราจะวาดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสลงบนโปรแกรมเขียนแบบโดยใช้คำสั่ง LINE ซึ่งมีขนาด ทิศทาง และลำดับดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 5.8 แผนผังขั้นตอนการเขียนโปรแกรมถอดรหัสเอชพีจีแอล



รูปที่ 6.1 การทดสอบทางเดินแบบร่าง

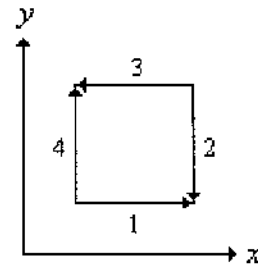
เมื่อทำการพล็อตข้อมูลลงสู่แฟ้มข้อมูล ผลที่ได้ของทางเดินที่ได้จากทั้งสองวิธีเป็นดังนี้

6.1.1 การทดสอบการพล็อตแบบไม่มีการรวบรัดเส้นทางเดิน (No Optimize)

ผลที่ได้ของลำดับและเส้นทางการพล็อตจะเป็นดังรูปที่ 6.2

ซึ่งขั้นตอนในการพล็อตจะมีทั้งสิ้น 10 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มพล็อตจากจุดเริ่มต้น ที่จุด (0,0) วิ่งไปยังจุด (50,0) ตามเส้นทางหมายเลข 1

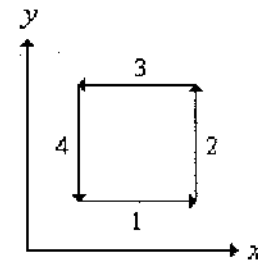


รูปที่ 6.2 การพล็อตแบบไม่มีการรวบรัดเส้นทางเดิน

2. ยกปากกาขึ้น แล้ววิ่งกลับมายังจุด (0,0)
3. วิ่งจากจุด (0,0) ต่ไปยังจุด (50,50)
4. เริ่มพล็อตจากจุดเริ่มต้นที่จุด (50,50) วิ่งไปยังจุด (50,50) ตามเส้นทางหมายเลข 2
5. ยกปากกาขึ้น แล้ววิ่งกลับมายังจุด (50,50)
6. เริ่มพล็อตจากจุดเริ่มต้นที่จุด (50,50) วิ่งไปยังจุด (0,50) ตามเส้นทางหมายเลข 3
7. ยกปากกาขึ้น แล้ววิ่งกลับมายังจุด (50,50)
8. วิ่งจากจุด (50,50) ต่ไปยังจุด (0,0)
9. เริ่มพล็อตจากจุดเริ่มต้นที่จุด (0,0) วิ่งไปยังจุด (0,50) ตามเส้นทางหมายเลข 3
10. ยกปากกาขึ้น แล้ววิ่งกลับมายังจุด (0,0)

6.1.2 การทดสอบแบบมีการรวบรัดเส้นทางเดิน (Optimize)

ผลที่ได้ของลำดับและเส้นทางการพล็อตจะเป็นดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การพล็อตแบบมีการรวบรัดเส้นทางเดิน

ซึ่งขั้นตอนในการพล็อตจะมีทั้งสิ้น 4 ขั้นตอน คือ

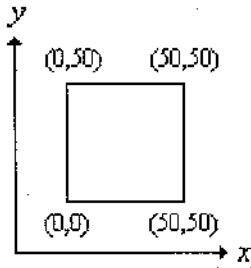
1. เริ่มพล็อตจากจุดเริ่มต้น ที่จุด (0,0) วิ่งไปยังจุด (50,0) ตามเส้นทางหมายเลข 1
2. วิ่งต่อไปยังจุด (50,50) ตามเส้นทางหมายเลข 2
3. วิ่งต่อไปยังจุด (0,50) ตามเส้นทางหมายเลข 3
4. วิ่งต่อไปยังจุด (0,0) ตามเส้นทางหมายเลข 4

จะเห็นได้ว่าการพล็อตรูปที่มีการรวบรัดเส้นทางเดินนั้น จะมีขั้นตอนการทำงานที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับแบบที่ไม่มีการรวบรัดเส้นทางเดิน อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการทำงานจะน้อยกว่า ดังนั้นการทดสอบต่อไป จะใช้การพล็อตรูปด้วยวิธีรวบรัดเส้นทางเดินเป็นค่าโดยปริยาย (default)

6.2 การทดสอบลำดับเส้นทางเดิน

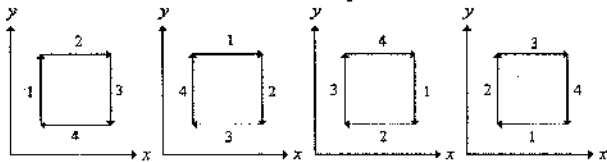
การทดสอบจะใช้ การพล็อตรูปแบบรวบรัดเส้นทางเดิน (optimize) โดยจะวาดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส รูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว รูปวงกลม และทั้งสามชนิดมาประกอบกัน โดยการทดสอบจะแบ่งได้ดังนี้

- 6.2.1 การวาดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 6.4 โดยใช้คำสั่ง LINE ซึ่งการทดสอบจะแบ่งทิศทางการวาดแบบร่างเป็น 2 ทิศทาง คือ



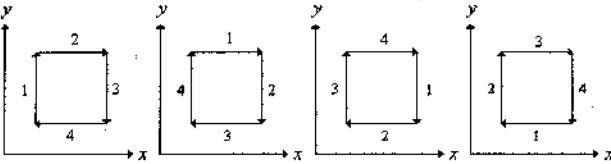
รูปที่ 6.4 การทดสอบการวาดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส

6.2.1.1 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งมีลำดับการวาดรูป
ต้นแบบนั้นเป็นดังรูปที่ 6.5



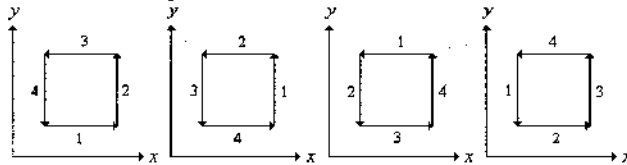
รูปที่ 6.5 รูปต้นแบบสี่เหลี่ยมจตุรัสทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.6



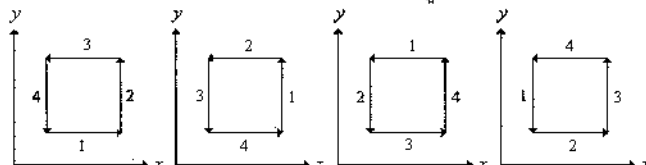
รูปที่ 6.6 ผลของทางเดินรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ได้

6.2.1.2 ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีลำดับการวาดรูป
ต้นแบบนั้นเป็นดังรูปที่ 6.7



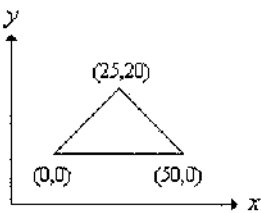
รูปที่ 6.7 รูปต้นแบบสี่เหลี่ยมจตุรัสทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ผลของทางเดินรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ได้

6.2.2 การวาดรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่
6.9 โดยใช้คำสั่ง LINE ซึ่งการ

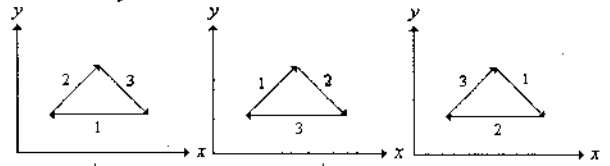


รูปที่ 6.9 การทดสอบการวาดรูปสามเหลี่ยม

ทดสอบจะแบ่งทิศทางการวาดแบบร่างเป็น 2 ทิศทาง คือ

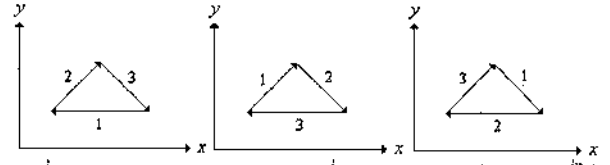
6.2.2.1 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งมีลำดับการวาดรูปต้น

แบบนั้นเป็นดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 รูปต้นแบบสามเหลี่ยมทิศทางตามเข็มนาฬิกา

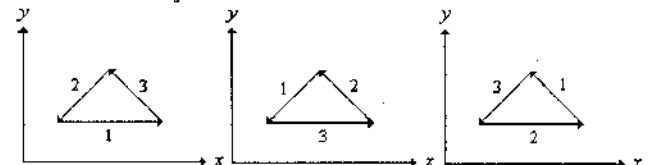
ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 ผลของทางเดินรูปสามเหลี่ยมทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ได้

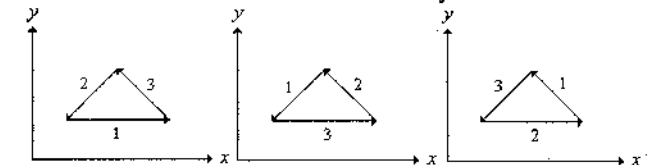
6.2.2.2 ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีลำดับการวาดรูป

ต้นแบบนั้นเป็นดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 รูปต้นแบบสามเหลี่ยมทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

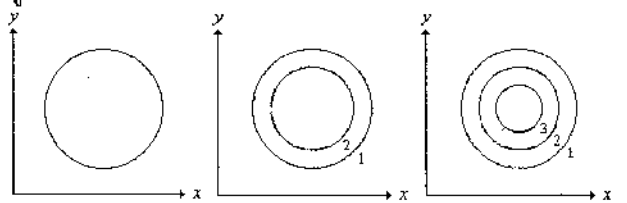
ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 ผลของทางเดินรูปสามเหลี่ยมทิศทางทวนเข็มนาฬิกาที่ได้

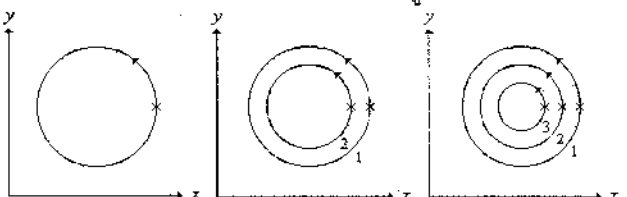
ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการพล็อตจุดบนทางเดินนั้น จะนำไป
ตามลำดับขั้นตอนตามลำดับเหมือนกับที่เราวาดตามโปรแกรมทุกประการ

6.2.3 การวาดรูปวงกลม การทดสอบจะสังเกตทิศทางการเดินทาง
ของการพล็อตจุดทางเดินบนวงกลม ซึ่งมีลำดับและทิศทางการเดินทางจะเป็น
ดังรูปที่ 6.14 ซึ่งในการวาดวงกลมนั้นใช้คำสั่ง CIRCLE



รูปที่ 6.14 รูปต้นแบบรูปวงกลม

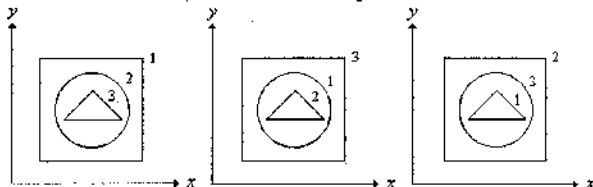
ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 ผลของทางเดินรูปวงกลมที่ได้

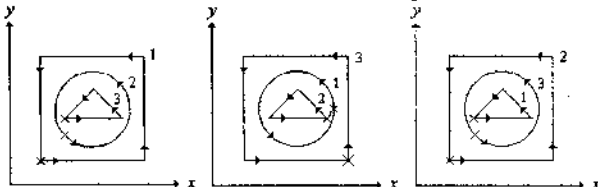
ตามรูปที่ 6.15 เครื่องหมายกากบาทจะแสดงถึงจุดเริ่มต้นของทางเดินและยังเป็นจุดสิ้นสุดของทางเดินในแต่ละวงของวงกลมตามลำดับหมายเลข ซึ่งจะเห็นว่าลำดับจะเป็นไปตามลำดับที่เราวาดตามโปรแกรมวาดแบบ ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ จะไปตามทิศทวนเข็มนาฬิกาเสมอ

6.2.4 การทดสอบรูปที่ซับซ้อน โดยประกอบด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส สามเหลี่ยมหน้าจั่ว และวงกลม ซึ่งการวาดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสามเหลี่ยมหน้าจั่วนั้น ใช้คำสั่งในการวาดคือ POLYGON ซึ่งขนาดรูปวง และทิศทางการพล็อตจุดต่างๆ เป็นไปตามรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 รูปต้นแบบรูปที่ซับซ้อน

ผลการทดสอบทิศทางการวาดเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 ผลของทางเดินรูปที่ซับซ้อนที่ได้

ซึ่งจะเห็นว่าลำดับจะเป็นไปตามลำดับที่เราวาดตามโปรแกรมวาดแบบ ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ จะไปตามทิศทวนเข็มนาฬิกาเสมอ

6.3 การทดลองเปลี่ยนความเร็วตามแนวทางการเดินทาง

การทดลองจะทำการทดลองที่ความเร็วตามแนวทางการเดินทางต่างๆ กัน 3 ค่า คือที่ความเร็ว 5mm./sec., 10 mm./sec. และ 15 mm./sec. โดยการกำหนดลักษณะของแนวทางการเดินทางเป็นลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงกลม และการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุมต่างๆ กัน ที่ความเร็ว 5 mm./sec. ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในลำดับต่อไป

6.3.1 การทดลองการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

ในการทดลองนี้ กำหนดให้วงกลมมีขนาดรัศมี 30 มม. จุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัดตำแหน่ง (100,100) มม. โดยกำหนดความเร็วตามแนวทางการเดินทางต่างๆ กัน 3 ค่า คือที่ความเร็ว 5 mm./sec., 10 mm./sec. และ 15 mm./sec. ซึ่งผลของการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 6.1

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วตามแนวทางการเดินทางค่าต่างๆ จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วต่ำกว่าที่ความเร็วตามแนวทางการเดินทางที่มีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เพราะระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมีลักษณะเป็นแบบจุดต่อจุด (point to point) ดังนั้นค่าเกณฑ์ของสัญญาณควบคุมที่ทำได้จะใช้ได้ดีที่ความเร็วช่วงหนึ่งเท่านั้น

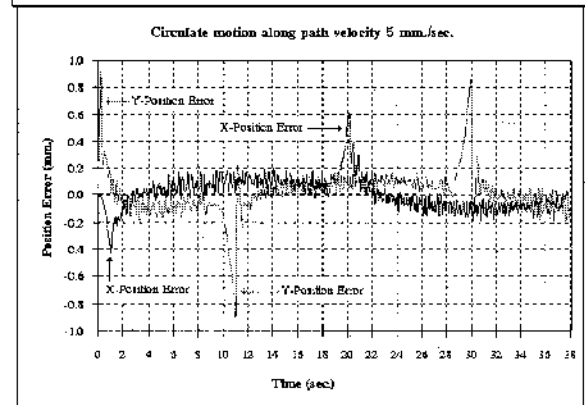
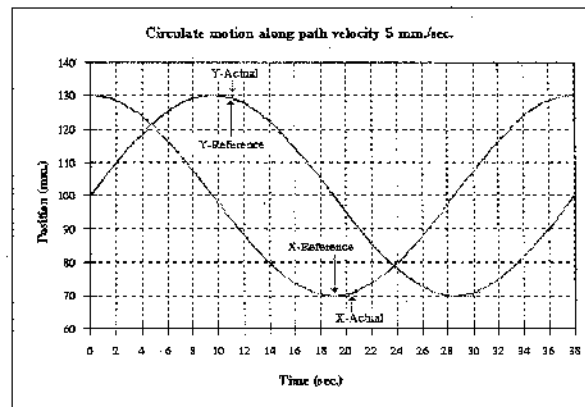
จากรูปที่ 6.18 และ 6.19 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลมที่มีความเร็วตามแนวทางการเดินทาง 0.005 m./sec. จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะเกิดขึ้นใน

ช่วงแรกของการเคลื่อนที่ และช่วงที่มีการกลับทิศทาง โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเคลื่อนที่กลับ

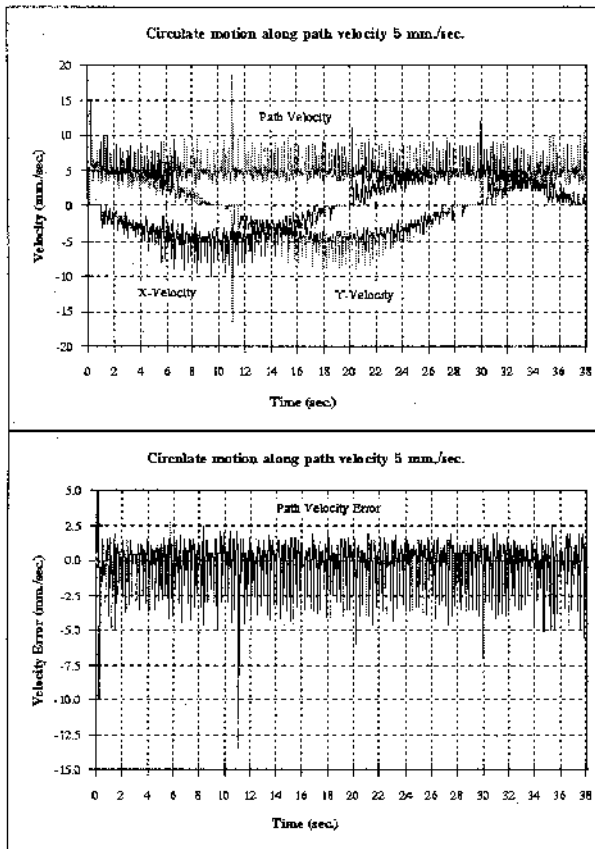
ทิศทางจะมีค่าความผิดพลาดสูงสุด ซึ่งสาเหตุมาจากในช่วงที่มีการกลับทิศทาง ระบบจะผ่านช่วง backlash ของชุดเฟืองทด ซึ่งเป็นช่วง non-linear โดยที่ชุดเฟืองทดของมอเตอร์ ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนแนวแกนเอ็กซ์ มีช่วงของ backlash 0.32 มิลลิเมตร ส่วนแกนวายมีช่วงของ backlash 0.45 มิลลิเมตร ซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าจุดที่มีการเปลี่ยนโค้งของจุดอ้างอิง ค่าตำแหน่งของระบบที่เกิดขึ้นจริง จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงดังกล่าวระบบไม่มีการเคลื่อนที่ เพราะผ่านช่วง backlash ของชุดเฟืองทกลส่วนรูปที่ 6.19 เป็นกราฟแสดงผลของความเร็วของแต่ละแกน และผลของความเร็วตามแนวทางการเดินทาง และค่าความผิดพลาดของความเร็วตามแนวทางการเดินทาง ซึ่งจะเห็นได้ว่า จุดที่ความเร็วมีค่าผิดพลาดมากคือ จุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดของตำแหน่ง ทั้งนี้เพราะในการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว ความถูกต้องของความเร็วจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของตำแหน่ง

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ที่ความเร็วตามแนวทางการเดินทางต่างๆ กัน

ความเร็วตามแนวทางการเดินทาง (ม./วินาที)	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่ง (มม.)		ค่าความผิดพลาดสูงสุดของความเร็วตามแนวทางการเดินทาง (ม./วินาที)
	แกนเอ็กซ์	แกนวาย	
0.005	0.61	0.92	0.00738
0.010	0.91	1.43	0.02007
0.015	1.19	1.76	0.03138



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีความเร็ว 0.005 m./sec.



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีความเร็ว 0.005 m./sec.

6.3.2 การทดลองการเคลื่อนที่เส้นตรงที่มีการหักมุม

ในการทดลองนี้ กำหนดให้การเคลื่อนที่ที่มีการหักมุมต่างๆ กัน คือ 45 องศา, 75 องศา และ 90 องศา โดยกำหนดความเร็วตามแนวทางเดินที่ความเร็ว 5 mm./sec. ซึ่งผลของการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 6.2

จากตารางที่ 6.2 จะพบว่าทางเดินของเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วมากกว่าทางเดินของเส้นตรงที่มีการหักมุม 75 องศาและ 90 องศา เนื่องจากการที่มีการหักมุมที่แหลมมากๆ นั้น จะทำให้เกิดการกลับทิศทางเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลกระทบต่อโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบโดยตรง และยังมีผลมาจากชุดเฟืองทดในลักษณะของ backlash

จากรูปที่ 6.20 และ 6.21 เป็นกราฟแสดงการทดสอบผลความแม่นยำ เมื่อแนวทางเดินเป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา โดยมีความเร็วตามแนวทางเดิน 0.005 m./sec. จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีการเคลื่อนที่กลับทิศทาง ซึ่งในกรณีการเคลื่อนที่ของเส้นตรงที่มีการหักมุม ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะมีทั้งผลจากค่า backlash ของชุดเฟืองทด และผลของโมเมนต์ของระบบแกน

7) สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 1 โปรแกรมหลัก ซึ่งการใช้งาน สามารถใช้ร่วมกับเมาส์คอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งโปรแกรมย่อยๆ ประกอบด้วย

7.1 โปรแกรมแสดงภาพข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลรหัสเอชพีจีแอล มีหน้าที่แสดงภาพข้อมูลแบบที่วาดจากโปรแกรมมอโต้แคด ก่อนการถอดรหัสข้อมูล

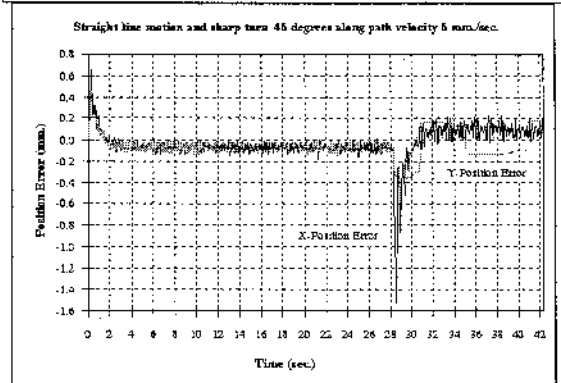
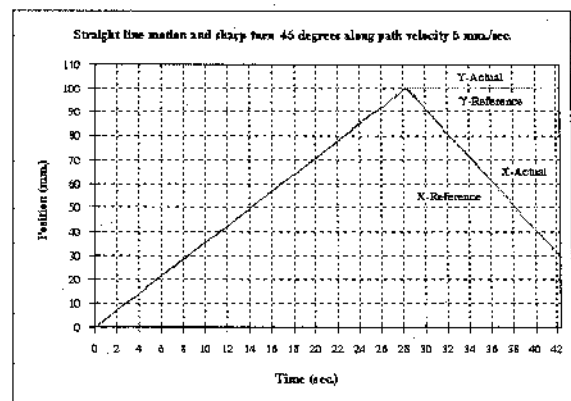
7.2 โปรแกรมถอดรหัสเอชพีจีแอล มีหน้าที่ถอดรหัสข้อมูลภาษาเอชพีจีแอล จากโปรแกรมมอโต้แคด มาเป็นค่าจุดพิกัดตำแหน่ง ซึ่งจะใช้เป็นจุดพิกัดตำแหน่งอ้างอิง ที่จะนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมโต๊ะเอ็กส์วายแซดต่อไป

7.3 โปรแกรมจำลองแบบทางเดินของกระบวนการควบคุมโต๊ะเอ็กส์วายแซด ก่อนการควบคุมจริง ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ทางเดินที่แน่นอนของกระบวนการควบคุมนั้นๆ ก่อนการควบคุมที่จะเกิดขึ้นจริงๆ และยังสามารรถใช้ศึกษาเส้นทางเดินของพล็อตเตอร์ ในการวาดรูปแบบต่างๆ

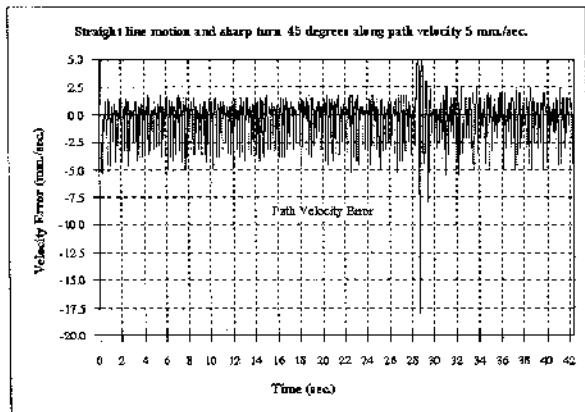
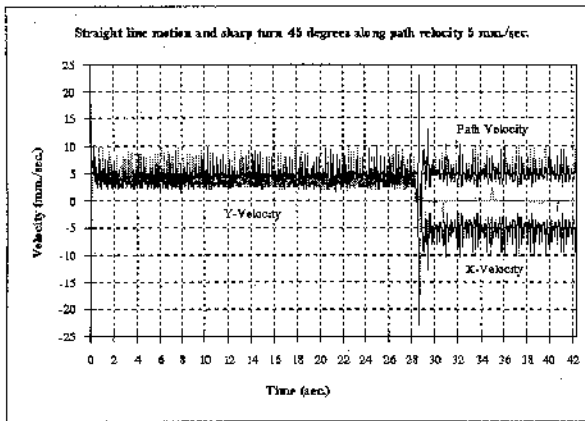
7.4 โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะเอ็กส์วายแซด มีหน้าที่ควบคุมโต๊ะเอ็กส์วายแซด โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้น จากแฟ้มข้อมูลจุดพิกัดตำแหน่งอ้างอิง ที่ได้ผ่านการถอดรหัสมาแล้วข้างต้น โดยที่จะแสดงค่าพิกัดตำแหน่งของแกนทั้งสามแกนบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ตลอดกระบวนการควบคุม เพื่อที่ผู้ใช้จะได้รับทราบค่าพิกัดตำแหน่ง ปัจจุบันของทั้งสามแกนตลอดกระบวนการ

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ที่มีการหักมุมต่างๆ กัน ที่ความเร็วตามแนวทางเดิน 5 มม./วินาที

มุมหัก (องศา)	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่ง (มม.)		ค่าความผิดพลาดสูงสุดของความเร็วตามแนวทางเดิน (ม./วินาที)
	แกนเอ็กส์	แกนวาย	
45	1.53	0.71	0.01800
75	1.41	0.69	0.01565
90	1.32	0.65	0.01320



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา ที่ความเร็ว 0.005 m./sec.



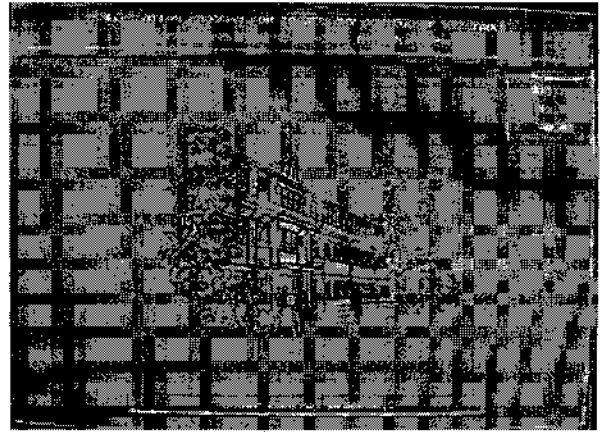
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา ที่ความเร็ว 0.005 m./sec

จากการทดสอบโปรแกรมอตรหัส ค่าจุดพิกัดตำแหน่งที่ได้ นั้น มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง ± 0.025 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า backlash ของชุดเฟืองทด ซึ่งมีค่า 0.32 มิลลิเมตร สำหรับแกนเอ็กซ์ และ 0.45 มิลลิเมตร สำหรับแกนวาย

จากการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของโต๊ะเอ็กซ์วายแซด โดยใช้โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ที่ได้โปรแกรมขึ้นมาใช้ทดสอบ พบว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อการเคลื่อนที่เป็นแบบวงกลมที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน คือ 0.005 m./sec., 0.010 m./sec. และ 0.015 m./sec. จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งคือ 0.92 mm., 1.43 mm. และ 1.76 mm. ตามลำดับ และค่าความผิดพลาดสูงสุดของความเร็วคือ 0.01356 m./sec., 0.01600 m./sec. และ 0.02798 m./sec. ตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา, 75 องศา และ 90 องศา ที่ความเร็วตามแนวทางเดิน 0.005 m./sec. ซึ่งค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่ง เมื่อการเคลื่อนที่มีการหักมุม คือ 0.00153 m., 0.00141 m. และ 0.00132 m. ตามลำดับ ส่วนค่าความผิดพลาดสูงสุดของความเร็วคือ 0.01800 m./sec., 0.01565 m./sec. และ 0.01320 m./sec. ตามลำดับ

เมื่อสังเกตจะพบว่า การเคลื่อนที่แบบเส้นตรงที่มีการหักมุม 45 องศา จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วมากกว่าการเคลื่อนที่ที่มีการหักมุม 75 และ 90 องศา เนื่องจากการหักมุมเป็นมุม

แหลมมากๆ นั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการไม่เคลื่อนที่ของแกนนั้นๆ ช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจาก backlash ของชุดเฟืองทด ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดการผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วขึ้น ซึ่งนอกจากนี้ยังมีผลมาจากน้ำหนักของระบบแกน ซึ่งจะมีผลกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบแกน เนื่องจากระบบแกนแซดมีน้ำหนักค่อนข้างมาก และจุดศูนย์กลางโน้มถ่วง (Center of gravity) อยู่ค่อนข้างสูง เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดโมเมนต์ความเฉื่อยเนื่องจากการถ่ายเทน้ำหนัก (weight transfer) ในทิศทางเดิม ก่อนการกลับทิศทางการเคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้



รูปแสดงผลการ plot ที่ได้จากโปรแกรม AutoCAD

เอกสารอ้างอิง

- 1) วรสิทธิ์ มารัตน์. การควบคุม พี.ไอ.ดี.พี. ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วย ปลิวไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- 2) Bollinger, John, G. Computer Control of Machine and Processes. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1988.
- 3) Graphtec Corporation, X-Y Plotter MP3000 Series User's Manual. 1987.
- 4) Kuo, B, C. Automatic Control System. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 1985.
- 5) Ogata, K. Modern Control Engineering. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 1984.
- 6) Palm, William, J. Control System Engineering. John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- 7) Roland DG Corporation, X-Y Plotter DXY-880 Operation Manual. 1985.
- 8) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก, รายงานฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, พฤษภาคม 2535
- 9) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์, สำนักพิมพ์จุฬาราย