

# เทคนิคการควบคุมแบบดิจิทัลสำหรับติดตามคอนทัวร์ 3 มิติ

## A DIGITAL CONTROL TECHNIQUE FOR 3D CONTOUR TRACKING

ฉเนศ เรืองสุระกิจ

ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
พญาไท กรุงเทพฯ 10330

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการนำทฤษฎีการควบคุมแบบดิจิทัล มาใช้กับโต๊ะเคลื่อนที่ในระบบคาที่เขียนและใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม โดยเพิ่มส่วนเคลื่อนที่ในแนวแกน z และมีอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ที่มีความละเอียดสูง เพื่อทำการติดตามคอนทัวร์ของชิ้นงานโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y ที่สร้างขึ้นในแบบต่าง ๆ ด้วยความเร็วที่กำหนด การเคลื่อนที่ในแนวแกน z จะควบคุมระยะห่างระหว่างหัววัดกับผิวของชิ้นงานให้คงที่ ซึ่งทำให้ได้ตำแหน่งของชิ้นงานในลักษณะ 3 มิติ ข้อมูลนี้สามารถนำไปสร้างชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกันได้

จากการทดลองการเคลื่อนที่รูปแบบพื้นฐานของแกนต่าง ๆ เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าค่าผิดพลาดในแนวแกน x และ y มีค่า 0.53 มิลลิเมตร และ 0.47 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนแนวแกน z เมื่อเคลื่อนที่ในรูปคลื่นไซน์ มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร และในการทดลองการเก็บข้อมูลตำแหน่งของชิ้นงานจริง พบว่าค่าผิดพลาดของแนวแกน z มีค่าสูงสุดประมาณ 0.6 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะทำให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่าการเคลื่อนที่ที่ความเร็วสูง นอกจากนี้ค่าผิดพลาดยังเนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ และค่าผิดพลาดในแกน x และ y เกิดจากค่าแบคแลชในแต่ละแกนของชุดเฟืองทด ส่วนค่าผิดพลาดในแกน z นั้นเกี่ยวข้องกับระดับของโต๊ะทดลอง

A digital control technique is used for designing a digital controller for the xyz table. A high resolution laser device is used to track the contour of surfaces in z-direction by keeping a constant distance between the laser device and the surface of the scanned parts. Various scanning patterns are generated for a movement in x and y directions at specified velocity. The coordinates of measured surface can be used for regenerating the surface with similar shape and size.

From the studies of the basic scanning patterns, the velocity is set at 10 mm/s., the results show the error of 0.53 mm. and 0.47 mm. in x and y direction, respectively. The error of the measurement of the sine wave contour in z-direction is found to be 0.3 mm. However, the maximum error in z-direction tracking of the specimen is 0.6 mm. Furthermore, the faster the scanning velocity, the higher the error. The error is also due to the limitation of a laser device. In addition, the main errors in x and y directions also come from the backlash of each directions gear box while the error in the z-direction is from the levelling of the table.

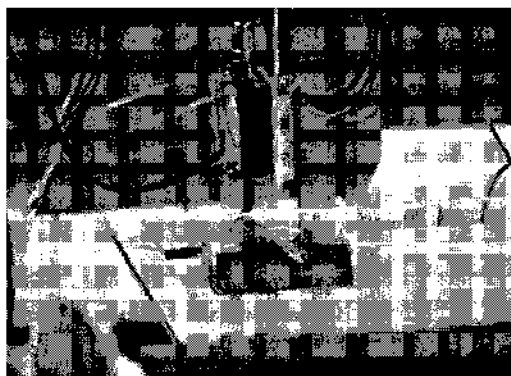
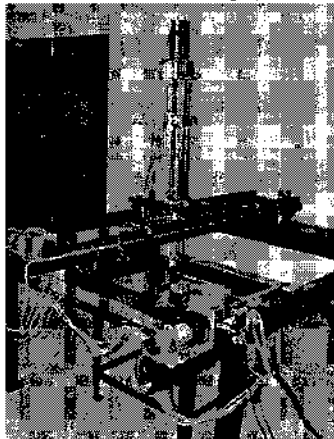
### 1) คำนำ

ถึงแม้ว่าอุปกรณ์วัดทางอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ควบคุม และเทคโนโลยีต่างๆ ได้มีการพัฒนาปรับปรุงมาตลอด แต่การศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ให้สามารถใช้งานได้เองในประเทศไทยยังมีอยู่น้อยเมื่อเทียบกับต่างประเทศที่มีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี โดยส่วนใหญ่เป็นการนำเอาอุปกรณ์จากต่างประเทศมาใช้ ข้อดีของการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ มาใช้ในงานควบคุมระบบต่างๆ มีหลายประการ เช่น สามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายลักษณะ มีราคา

ไม่แพงเมื่อเทียบกับผลงานที่ได้ สามารถทำงานที่ซ้ำ ๆ ได้โดยมีข้อผิดพลาดน้อย คุณภาพของงานสม่ำเสมอเป็นมาตรฐาน ทำงานในที่ ๆ มีอันตรายสูงแทนคน และยังเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้ตามคำสั่ง ซึ่งผลที่ได้คือการทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและได้มาตรฐาน

ในปัจจุบัน เครื่องมือที่ใช้ในการวัดขนาดของชิ้นงานมีอยู่หลายแบบ ตั้งแต่วิธีวัดที่ใช้อุปกรณ์ที่หาได้ทั่วไปจนถึงวิธีที่ต้องใช้อุปกรณ์วัดที่มีความสามารถในการวัดได้แม่นยำหรือมีความละเอียดสูง ยิ่งต้องการความถูกต้องมากเท่าใด อุปกรณ์ที่ใช้ก็ยิ่งมีราคาสูงมากเท่านั้น ไม่

เพียงแต่องค์ประกอบด้านราคาเท่านั้น แต่ยังคงรวมถึงวิธีในการวัดหรือการนำอุปกรณ์มาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปที่ 1.1 รูปโต๊ะ XYZ

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติได้สร้างโต๊ะ XYZ ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.1 เพื่อจุดประสงค์ให้เป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบระบบควบคุมชนิดต่างๆ และได้ทดลองสร้างแนวทางเดินของชุดเคลื่อนที่ที่มีความเร็วต่างๆ เกิดความผิดพลาดที่ภาระขนาด 10 กิโลกรัมในการเคลื่อนที่รูปวงกลมดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่ความเร็วต่าง ๆ สำหรับภาระ 10 กิโลกรัม

ความเร็ว (มิลลิเมตร/วินาที)	ความผิดพลาดแกน x (มิลลิเมตร)	ความผิดพลาดแกน y (มิลลิเมตร)
5	0.61	0.55
15	0.71	1.04
25	0.61	1.45

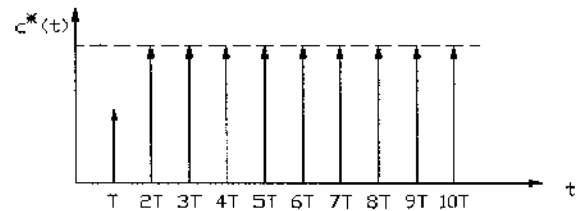
(หมายเหตุ เมื่อเอกสารนี้ตีพิมพ์ ห้องปฏิบัติการได้ปรับโต๊ะ XYZ ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นเช่นเปลี่ยนชุดเฟืองทดชนิดที่มีค่าแบคแลชน้อยมากสำหรับแกน x และ y และงานวิจัยนี้ตัวเลขทดลองได้ใช้เครื่องมือชุดที่ยังไม่ได้ปรับปรุง)

นอกจากความผิดพลาดที่เกิดจากภาระและความเร็วในการเคลื่อนที่แล้ว ยังมีมีความผิดพลาดที่เกิดจากค่าแบคแลช (BackLash) ของชุดเฟืองทด ซึ่งจากการทดสอบก่อนหน้านี้พบว่ามีความผิดพลาด 0.32 มิลลิเมตร และ 0.35 มิลลิเมตร ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ สำหรับโครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและทดลองการวัดขนาดรูปร่างของชิ้นงานโดยใช้เลเซอร์ (Laser) และ เอนโคเดอร์ (Encoder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดในการวัดสูง ควบคุมการทำงานและจัดเก็บข้อมูลโดย

คอมพิวเตอร์ ลักษณะของอุปกรณ์จะมีแกนเคลื่อนที่ได้ 3 แนวแกน ตั้งฉากซึ่งกันและกันตามระบบแกนแบบคาทีเซียน ใช้อุปกรณ์กระแสตรงเป็นตัวส่งกำลังให้เคลื่อนที่ไปมาได้ แนวแกน x และ y จะขนานกับพื้นระนาบ แนวแกน z เคลื่อนที่ขึ้นลงตั้งฉากกับพื้น มีอุปกรณ์วัดระยะแบบเอนโคเดอร์ติดอยู่ที่ทั้ง 3 แกนเพื่อวัดระยะทางที่เคลื่อนที่ไปและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์จะติดอยู่ที่ปลายของแกน z เพื่อตรวจระยะห่างระหว่างพื้นผิวของชิ้นงานกับหัววัด แล้วส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบระยะห่างและควบคุมให้คงที่ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกเก็บเป็นข้อมูลรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน ใช้การควบคุมแบบดิจิทัล (Digital Control) ซึ่งตามหลักการควบคุม จุดประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการให้ผลตอบสนองเป็นไปตามค่าที่ต้องการโดยเร็วที่สุดหรือมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด

## 2) ระบบควบคุมแบบดิจิทัล

ระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะ XYZ นี้จะเป็นระบบควบคุมแบบเดดบีท (DeadBeat controller) ในหัวข้อนี้จะกล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมแบบดิจิทัลกับผลตอบสนองแบบเดดบีท



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองแบบเดดบีทกับสัญญาณเข้าแบบยูนิตสเตป

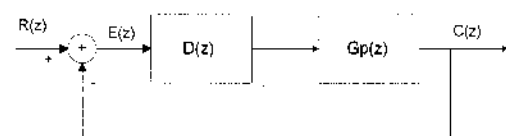
จุดประสงค์ของการออกแบบระบบควบคุม ต้องการให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ค่าอ้างอิงที่ต้องการโดยเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยไม่เกิดโอเวอร์ชูท (Overshoot) ผลตอบสนองแบบนี้มักจะกล่าวถึงลักษณะแบบเดดบีท ซึ่งระบบจะสามารถเข้าสู่ค่าอ้างอิงได้อย่างรวดเร็วโดยมีค่าผิดพลาดน้อย รูปที่ 2.1 แสดงผลตอบสนองแบบเดดบีทกับสัญญาณป้อนเข้าแบบยูนิตสเตป (Unit step) ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา  $t$  ผลที่ได้จะเป็นไปตามสัญญาณป้อนเข้าแบบยูนิตสเตปหลังจากการสุ่ม 2 ครั้ง สำหรับระบบข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องที่แสดงผลตอบสนองแบบเดดบีทตรงจุดที่ทำการสุ่มฟังก์ชันถ่ายโอนจะมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{1}{z^N} \quad (2.1)$$

โดยที่ N เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ดังนั้นสำหรับสัญญาณป้อนเข้าแบบยูนิตสเตป จะได้ผลดังนี้

$$C(z) = z^{-N} + z^{-N-1} + z^{-N-2} + \dots \quad (2.2)$$

ซึ่งมีลักษณะเดียวกับผลตอบสนองดังรูปที่ 2.1 เมื่อ  $N = 2$



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบดิจิทัล

หลักการของตัวควบคุมที่ได้ผลตอบสนองแบบเดดทีทสำหรับระบบควบคุมแบบดิจิทัล พิจารณาระบบที่มีสมการดังนี้

$$G_p(z) = \frac{z+0.5}{z^2-z-1} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.2 ให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมเป็นดังนี้

$$D(z) = \frac{z^2-z-1}{(z-1)(z+0.5)} \quad (2.4)$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดลูป (Open-loop transfer function) ของระบบดังนี้

$$G(z) = D(z)G_p(z) = \frac{1}{z-1} \quad (2.5)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดลูป (Closed-loop transfer function) คือ

$$M(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G(z)}{1+G(z)} = \frac{1}{z} \quad (2.6)$$

สำหรับสัญญาณป้อนเข้าแบบยูนิตสเตป (Unit-step input) จะได้สัญญาณออก

$$C(z) = \frac{1}{z} \frac{z}{z-1} = \frac{1}{z-1} = z^{-1} + z^{-2} + \dots \quad (2.7)$$

ดังนั้นผลตอบสนองที่ได้  $c(k)$  จะเข้าสู่ค่าที่ต้องการในช่วงเวลาการสุ่มเพียงครั้งเดียวโดยไม่เกิดโอเวอร์ชูท และคงอยู่ที่ค่านั้นต่อไป ผลตอบสนอง  $c(k)$  เรียกว่าผลตอบสนองแบบเดดทีท แต่ถ้า  $G_p(z)$  เป็นผลจากการสุ่มของกระบวนการข้อมูลแบบต่อเนื่อง ตัวควบคุมแบบดิจิทัล  $D(z)$  ที่ได้จะไม่ประกันได้ว่า ไม่เกิดการกระเพื่อม (Ripple) ระหว่างช่วงของการสุ่มในสัญญาณออกของข้อมูลต่อเนื่อง  $c(t)$

จะเห็นว่า หลักการออกแบบผลตอบสนองแบบเดดทีทจะใช้การนำเอาค่า โพลและซีโรของ  $D(z)$  มากำจัด ค่าซีโรและโพลของระบบ  $G_p(z)$  แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะระบบที่มีโพล และซีโรของ  $G_p(z)$  อยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยเท่านั้น

### 1. โพลและซีโรของ $G_p(z)$ ทั้งหมดอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย

พิจารณาเมื่อค่าโพลและซีโรของ  $G_p(z)$  ทั้งหมดอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย ผลตอบสนองแบบเดดทีท จะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ระบบต้องมีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงที่ (steady state error) เป็นศูนย์ตรงจุดที่ทำการสุ่ม สำหรับสัญญาณป้อนเข้าที่กำหนด
2. เวลาที่สัญญาณออก เข้าสู่ค่าที่สภาวะคงที่ต้องมีค่าน้อย และสามารถทราบเวลาที่สัญญาณเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงที่ได้
3. ตัวควบคุมแบบดิจิทัล  $D(z)$  ต้องสามารถเป็นไปได้ เช่น ต้องไม่มีจำนวนซีโรมากกว่าจำนวน โพล

จากรูปที่ 2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดลูปคือ

$$M(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{D(z)G_p(z)}{1+D(z)G_p(z)} \quad (2.8)$$

เราจะได้

$$D(z) = \frac{1}{G_p(z)} \frac{M(z)}{1-M(z)} \quad (2.9)$$

ค่าผิดพลาดจะเขียนได้เป็น

$$E(z) = R(z) - C(z) = R(z)[1-M(z)] = \frac{R(z)}{1+D(z)G_p(z)} \quad (2.10)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดลูป  $M(z)$  จะมีรูปแบบตามชนิดของสัญญาณป้อนเข้าดังนี้

### สัญญาณแบบสเตป (Step)

$$R(z) = \frac{z}{z-1} \quad M(z) = \frac{1}{z^n} \quad (2.11)$$

### สัญญาณแบบแรมพ์ (Ramp)

$$R(z) = \frac{Tz}{(z-1)^2} \quad M(z) = \frac{2z-1}{z^{n+1}} \quad (2.12)$$

### สัญญาณแบบพาราโบลา (Parabolic)

$$R(z) = \frac{T^2 z(z+1)}{(z-1)^3} \quad M(z) = \frac{3z^2-3z+1}{z^{n+2}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $n$  คือค่าของจำนวนโพลลบด้วยจำนวนซีโรของ  $G_p(z)$

### 2. โพลและซีโรของระบบอยู่บนหรืออยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย

ในกรณีนี้การนำเอาวิธีข้างต้น คือ การกำจัดค่าโพลและซีโรของ  $G_p(z)$  ด้วยซีโรและโพลของตัวควบคุม  $D(z)$  เมื่อ  $G_p(z)$  มีค่าโพลและซีโรอยู่บนหรืออยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย จะไม่สามารถกำจัดได้โดยสมบูรณ์ ซึ่งเกิดขึ้นในทางปฏิบัติ และทำให้เกิดระบบปิดลูปที่ไม่เสถียรขึ้นได้

กำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ถูกควบคุมเขียนได้ดังนี้

$$G_p(z) = \frac{\prod_{i=1}^K (1-z_i z^{-1})}{\prod_{j=1}^L (1-p_j z^{-1})} A(z) \quad (2.14)$$

โดยที่  $z_i, i=1,2,\dots,K$  และ  $p_j, j=1,2,\dots,L$  เป็นซีโรและโพลของ  $G_p(z)$  ที่อยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย และ  $A(z)$  เป็นเศษส่วนของฟังก์ชัน  $z^{-1}$  ที่โพลและซีโรอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย สมการของตัวควบคุมคือ

$$D(z) = \frac{\prod_{j=1}^L (1-p_j z^{-1})}{\prod_{i=1}^K (1-z_i z^{-1})} \frac{M(z)}{A(z)[1-M(z)]} \quad (2.15)$$

จะเห็นว่า  $M(z)$  ต้องประกอบด้วย  $\prod_{i=1}^K (1-z_i z^{-1})$

และ  $1-M(z)$  ต้องประกอบด้วย  $\prod_{j=1}^L (1-p_j z^{-1})$

โดยทั่วไป  $M(z)$  และ  $1-M(z)$  มีรูปแบบดังนี้

$$M(z) = (1-z_i z^{-1}) (M_k z^{-k} + M_{k+1} z^{-k-1} + \dots) \quad (2.16)$$

$$1-M(z) = (1-p_j z^{-1}) (1-z^{-1})^p (1+a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots) \quad (2.17)$$

ค่า  $k$  จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $n$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนโพลที่มากกว่าจำนวนซีโรของระบบ  $G_p(z)$  กำลังของพจน์  $(1-z^{-1})^p$ ,  $P$  มีค่าเท่ากับ กำลังของโพลของฟังก์ชันที่ป้อนเข้า ( $R(z)$ ) หรือเท่ากับ กำลังของโพลของระบบ ( $G_p(z)$ ) ที่  $z=1$  แล้วแต่ว่าค่าใดจะมากกว่ากัน

การเลือกจำนวนตัวที่ไม่ทราบค่ามีข้อกำหนดดังนี้

1. กำลัง (Order) ของโพลของ  $M(z)$  และ  $1-M(z)$  ต้องเท่ากัน
2. จำนวนตัวที่ไม่ทราบค่าโดยรวมใน  $M_k, M_{k+1}, \dots$  และ  $a_1, a_2, \dots$  ต้องเท่ากับกำลังของ  $M(z)$  ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถหาได้โดยไม่ต้องขึ้นแก่กัน

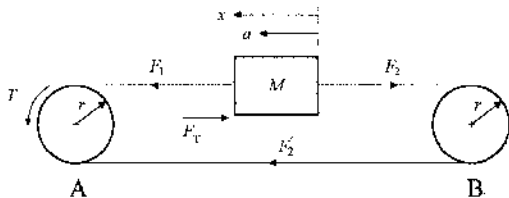
### 3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดเคลื่อนที่

การควบคุมระบบหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ จำเป็นที่จะต้องเข้าใจการทำงานและสภาวะของระบบ เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบควบคุมที่เหมาะสม และผลตอบสนองของระบบที่ดี จึงต้องทำการทดสอบระบบด้วยการจำลอง

ทางคณิตศาสตร์และทดสอบจากการทำงานจริง ระบบที่จำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากเท่าใด ตัวควบคุมที่หาได้ก็จะมีเหมาะสมสมมากเท่านั้น ถ้าตัวควบคุมที่ได้ไม่ถูกต้อง อาจทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เสถียร (Unstable) ขึ้นได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหาย

การทำงานของชุดเคลื่อนที่ ที่ใช้ มี 2 ลักษณะ คือ แกน x, y ใช้มอเตอร์และชุดเฟืองทดขับล้อที่มีมวลสลิงเป็นตัวส่งกำลัง ส่วนแกน z มอเตอร์จะขับบอลสกรูโดยตรง เราสามารถพิจารณาระบบขับเคลื่อนแต่ละแกนโดยจำลองการทำงานได้ดังนี้

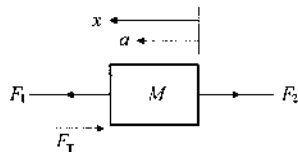
### 3.1 แบบจำลองของแกน x และ y



รูปที่ 3.1 แผนภาพอิสระ ของชุดเคลื่อนที่แกน X, Y

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพอิสระของระบบเคลื่อนที่แกน x และ y โดยใช้มอเตอร์ที่ล้อ A รัศมี r ขับดึงลวดสลิงซึ่งผูกติดอยู่กับมวล M มีแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานของดรัมลูกปืนที่รองรับ  $F_T$  เมื่อมอเตอร์หมุนขับให้ทิศทวนเข็มนาฬิกา เกิดแรงดึง  $F_1$  ตามแนวสลิงทำให้มวล M เคลื่อนที่ไปทางซ้ายด้วยความเร็ว  $a$  ที่ระยะ  $x$  ใด ๆ ส่วนกับแรงเสียดทาน  $F_T$  และแรงดึง  $F_2$  จากล้อ B

พิจารณา แผนภาพอิสระของมวล M



รูปที่ 3.2 แผนภาพอิสระของมวล M

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน  $\sum F = Ma$ ;

$$F_1 - F_2 - F_T = Ma$$

$$F_1 - F_2 - \mu Mg = Ma \quad (3.1)$$

$$a = r\ddot{\theta};$$

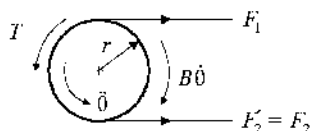
$$F_1 - F_2 = M(r\ddot{\theta} + \mu g) \quad (3.2)$$

$m$  = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดรัมลูกปืน = 0.015

$g$  = ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/sec<sup>2</sup>

$r$  = รัศมีของล้อ = 0.025 m

พิจารณาแผนภาพอิสระของล้อ A



รูปที่ 3.3 แผนภาพอิสระของล้อ A

ถ้าไม่คิดแรงเสียดทานที่แกนของล้อ B จะได้ว่า  $F_2 = F_2'$  จากสมการ

$$\sum \text{Moment} = J\ddot{\theta};$$

$$T - r(F_1 - F_2) - B\dot{\theta} = J\ddot{\theta} \quad (3.3)$$

โดยที่  $T$  = แรงบิดจากมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

$J$  = โมเมนต์แรงเฉื่อยของล้อและมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

$B$  = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีงของมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

จากการเคลื่อนที่แบบเชิงมุมเป็นแบบเชิงเส้นจะได้ว่า  $x = r\theta$  จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ  $x = r\theta$  จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$T - r^2 M\ddot{\theta} - \mu r Mg = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta}$$

$$\left( J_m + \frac{r^2 M}{n^2} \right) \frac{n}{r} \ddot{x} + \frac{n}{r} B_m \dot{x} = T_m - \frac{\mu r Mg}{n} \quad (3.4)$$

กำหนดให้

$T_m$  = แรงบิดจากมอเตอร์ =  $K_T \cdot i$

$K_T$  = ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์

$i$  = กระแสที่ป้อนให้มอเตอร์

$M$  = มวลที่เคลื่อนที่

$J_m$  = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์

$B_m$  = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีงของมอเตอร์

$x$  = ระยะที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้น

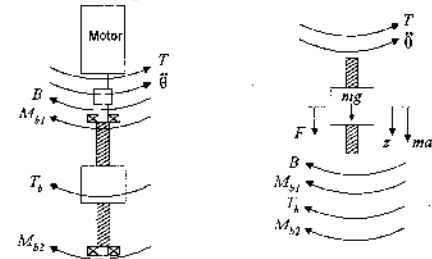
$r$  = รัศมีของล้อสายพาน

$n$  = อัตราทดของเฟืองขับ

### แบบจำลองของแกน z

#### 1. ขณะเคลื่อนที่ขึ้น

จากรูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพอิสระของระบบเคลื่อนที่แกน z โดยใช้มอเตอร์ขับบอลสกรูโดยตรงซึ่งทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตามทิศทางการหมุน มีแรงเสียดทานจากดรัมบอลสกรูและดรัมลูกปืนที่รองรับปลายทั้งสองด้านของสกรู



รูปที่ 3.4 แผนภาพอิสระของชุดเคลื่อนที่แกน z ขณะเคลื่อนที่ขึ้น

พิจารณาแผนภาพอิสระขณะเคลื่อนที่ขึ้นที่ระยะ z ใด ๆ

$$\sum \text{Moment} = J\ddot{\theta}; \text{ และ } \sum F = ma; \text{ จะได้}$$

$$\left( J_{motor} + \frac{m_{screw} a^2}{2} + \frac{ml^2}{4\pi^2 \eta} \right) \frac{2\pi}{l} \ddot{z} + B \frac{2\pi}{l} \dot{z} = \quad (3.5)$$

$$T - \frac{mgl}{2\pi\eta} - M_{b1} - M_{b2}$$

โดยที่

$T$  = แรงบิดของมอเตอร์

$J_{motor}$  = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์

$m$  = มวลภาระที่ต้องขับเคลื่อน

$m_{screw}$  = มวลภาระของบอลสกรู

$a$  = รัศมีของเพลาลูกบอลสกรู

$B$  = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีงของมอเตอร์

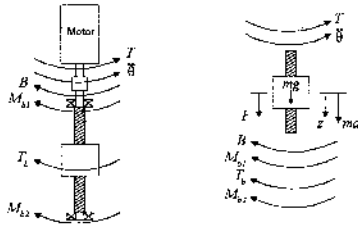
$T_o$  = แรงเสียดทานจากบอลสกรู =  $ml/2\pi\eta$

$F$  = ภาระที่กระทำกับแกน z

<sup>1</sup> "Star the linear motion product range", Deutsche star GmbH, May 1990

$M_{b1}, M_{b2}$  = แรงเสียดทานจากดรัมลูกปืนที่ปลายสกรูทั้งสองข้าง  
 $l$  = ระยะเคลื่อนที่ของบอลสกรูต่อการหมุน 1 รอบ (lead)  
 $h$  = ประสิทธิภาพการทำงานของบอลสกรู

2. ขณะเคลื่อนที่ลง

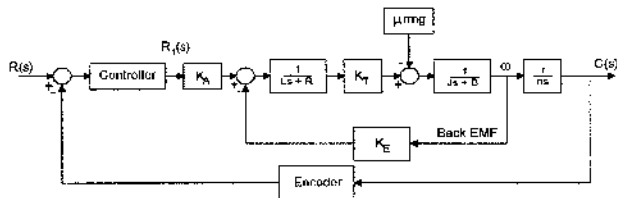


รูปที่ 3.5 แผนภาพอิสระของชุดเคลื่อนที่แกน z ขณะเคลื่อนที่ลง สมการของชุดเคลื่อนที่แนวแกน z ขณะเคลื่อนที่ลง

$$\left( J_{motor} + \frac{m_{screw} a^2}{2} + \frac{ml^2}{4\pi^2 \eta} \right) \frac{2\pi}{l} \ddot{z} + B \frac{2\pi}{l} \dot{z} = T + \frac{mgl}{2\pi\eta} - M_{b1} - M_{b2} \quad (3.6)$$

3.2 แบบจำลองแบบแผนภูมิ

การควบคุมในแนวแกน x และ y เป็นลักษณะการขยายแรงดัน (Voltage amplifier)



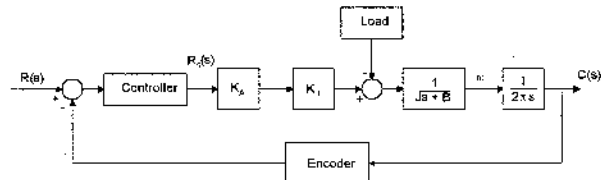
รูปที่ 3.6 แผนภูมิระบบควบคุมแนวแกน x และ y จากรูปที่ 3.6 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ถูกควบคุมได้ดังนี้

$$\frac{C_x(s)}{R_x(s)} = \frac{K_{Ax} K_{Tx} r/n}{s[(L_x s + R_x)(J_x s + B_x) + K_{Tx} K_{Tx}]} \quad (3.7)$$

เมื่อพิจารณาค่าความเหนียวนำของขดลวด (L) มีค่าน้อยกว่าความต้านทาน(R) ของระบบ ( $L \ll R$ ) เราสามารถลดรูปของสมการที่ 3.7 ได้เป็น

$$\frac{C_x(s)}{R_x(s)} = \frac{K_{Ax} K_{Tx} r/n}{s(R_x J_x s + R_x B_x + K_{Tx} K_{Tx})} \quad (3.8)$$

สำหรับการควบคุมในแกน z จะเป็นลักษณะการขยายกระแส (Current amplifier)



รูปที่ 3.7 แผนภูมิระบบควบคุมแนวแกน z และจากรูปที่ 3.7 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระบบของชุดเคลื่อนที่แกน z ได้ดังนี้

$$\frac{C_z(s)}{R_z(s)} = \frac{K_{Az} K_{Tz} l/2\pi}{s(J_z s + B_z)} \quad (3.9)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการข้างต้นกับสมการที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นว่าภาระ (Load) ที่กระทำในรูปที่ 3.7 คือ แรงเสียดทานจากบอลสกรูและจากแบร์ริง

จัดให้อยู่ในรูปทั่วไป

$$G_p(s) = \frac{K}{s(s+a)} \quad (3.10)$$

ค่าตัวแปรของแกนต่าง ๆ จะเป็นดังนี้

แกน x

$$K = K_{Ax} K_{Tx} r/n, \quad a = \frac{R_x B_x + K_{Tx} K_{Tx}}{R_x J_x}$$

แกน y

$$K = K_{Ay} K_{Ty} r/n, \quad a = \frac{R_y B_y + K_{Ty} K_{Ty}}{R_y J_y}$$

แกน z

$$K = K_{Az} K_{Tz} l/2\pi, \quad a = \frac{B_z}{J_z}$$

$K_{Ax}, K_{Ay}, K_{Az}$  = อัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์ แกน x, y, z

$K_{Tx}, K_{Ty}, K_{Tz}$  = ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (Torque Constant)

แกน x, y, z

$K_{Ex}, K_{Ey}$  = ค่าคงที่แรงดัน (Voltage Constant) แกน x, y

$r$  = รัศมีล้อขับเคลื่อน

$l$  = ระยะเคลื่อนที่ต่อรอบของบอลสกรู

$n$  = อัตราทดของชุดเฟือง

$J$  = ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์และภาระ

$$= J_{motor} + \frac{mr^2}{n^2}, \text{ สำหรับแกน x, y}$$

$$= J_{motor} + \frac{m_{screw} a^2}{2} + \frac{ml^2}{4\pi^2}, \text{ สำหรับแกน z}$$

$L_x, L_y$  = ค่าความเหนียวนำของมอเตอร์ (Inductance) แกน x, y

$B_x, B_y, B_z$  = ค่าคงที่แดมปีง (Damping Constant) แกน x, y, z

$R_x, R_y$  = ค่าความต้านทานของขดลวดมอเตอร์ แกน x, y

เมื่อเราสามารถหาสมการของระบบได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การวิเคราะห์ความเป็นไปของระบบ เพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสม และทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปการวิเคราะห์ที่นำมาใช้ เช่น การหาผลตอบสนองของระบบจากการป้อนสัญญาณเข้าในรูปแบบต่าง ๆ การทดสอบดูความเสถียรของระบบ จากหัวข้อการหาตัวควบคุมแบบดิจิตอลในบทที่ 2 จะเห็นว่า ต้องทำการแปลงสมการของระบบในรูป s ให้อยู่ในรูป z ก่อน จากนั้นจึงทำการหาตัวควบคุมในแต่ละแกนตามขั้นตอนต่อไป

จากสมการในรูปทั่วไป 3.10 ทำให้อยู่ในรูป z ได้ดังนี้

$$G_p(z) = Z [G_{h0} G_p(s)] \quad (3.11)$$

$$= Z \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{K}{s(s+a)} \right] \quad (3.12)$$

$$= \frac{K(Ta - 1 + e^{-aT})}{a^2} \left[ \frac{z + \frac{(1 - Ta e^{-aT} - e^{-aT})}{(Ta - 1 + e^{-aT})}}{(z-1)(z - e^{-aT})} \right] \quad (3.13)$$

เมื่อแทนค่าของระบบทั้งหมด จะได้สมการของชุดเคลื่อนที่ในแนวแกนต่าง ๆ ที่เวลาการสุ่ม  $T = 0.02$  วินาที

แกน x

$$G_{px}(s) = \frac{1.248585}{s(s + 69.3222)} \quad (3.14)$$

$$G_{pz}(z) = \frac{0.00016535(z + 0.633995)}{(z - 1)(z - 0.249963)} \quad (3.15)$$

แกน y

$$G_{py}(s) = \frac{1.26684}{s(s + 70.3357)} \quad (3.16)$$

$$G_{pz}(z) = \frac{0.00016688(z + 0.629903)}{(z - 1)(z - 0.244947)} \quad (3.17)$$

แกน z

$$G_{pz}(s) = \frac{4.20226}{s(s + 0.256409)} \quad (3.18)$$

$$G_{pz}(z) = \frac{0.00083902(z + 0.99829)}{(z - 1)(z - 0.99489)} \quad (3.19)$$

### 3.3 การหาสมการตัวควบคุม

เมื่อได้สมการของระบบที่ถูกควบคุมในรูป  $z$  แล้ว เราสามารถหาสมการของตัวควบคุมจากระบบที่ถูกควบคุมที่ไม่มีการกระเพื่อมระหว่างการสุ่ม (without intersampling ripple) ได้ดังนี้

จัดรูปแบบสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดรูปได้ดังนี้

$$M(z) = (1 + c z^{-1}) M_1 z^{-1} \quad (3.20)$$

$$1 - M(z) = (1 - z^{-1})(1 + a_1 z^{-1}) \quad (3.21)$$

โดยที่  $c = (1 - T a e^{-aT} - e^{-aT}) / (T a - 1 + e^{-aT})$  เทียบสัมประสิทธิ์แล้วแก้สมการ จะได้ค่าตัวแปรของสมการ 3.20 และ 3.21 คือ

$$M_1 = \frac{1}{1 + c} \quad (3.22)$$

$$a_1 = \frac{c}{1 + c} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 2.9 สมการตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองแบบเดดบิทคือ

$$D(z) = \frac{1}{G_p(z)} \cdot \frac{M(z)}{1 - M(z)} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 3.20, 3.21, 3.22 และ 3.23 แทนลงในสมการ 2.21 จะได้

$$D(z) = \frac{z - e^{-aT}}{K[(1 + c)z + c]} \quad (3.24)$$

เราสามารถกระจายสมการที่ 3.24 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบ ( $m$ ) กับ ค่าความแตกต่างของระยะทาง ( $e$ ) ได้ดังนี้

$$m(0) = \frac{1}{K(1 + c)} e(0) - \frac{e^{-aT}}{K(1 + c)} e(1) - \frac{c}{1 + c} m(1) \quad (3.25)$$

$m(0)$  = แรงดันด้านออกจากตัวควบคุมที่เวลาปัจจุบัน

$m(1)$  = แรงดันด้านออกจากตัวควบคุมที่เวลา ก่อนหน้า 1 คาบการสุ่ม  
=  $m(0)$  ที่เวลาการสุ่มครั้งที่แล้ว

$e(0)$  = สัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมที่เวลาปัจจุบัน

$e(1)$  = สัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมที่เวลา ก่อนหน้า 1 คาบการสุ่ม  
=  $e(0)$  ที่เวลาการสุ่มครั้งที่แล้ว

ตัวแปร  $e(k)$  คือสัญญาณค่าผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างระหว่าง ตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ กับ ตำแหน่งปัจจุบันที่เคลื่อนที่ไปได้จริง ถูกป้อนให้กับตัวควบคุมเพื่อทำการคำนวณ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า  $m(k)$  ซึ่งป้อนให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของระบบต่อไป

ในกรณีที่สัญญาณด้านเข้าเป็นแรมพ์ (Ramp) ตัวควบคุมจะเหมือนกับตัวควบคุมที่ได้จากสัญญาณป้อนเข้าแบบสเตป (Step) เนื่องจากสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดรูป  $M(z)$  กับ  $1 - M(z)$  จะเหมือนกัน เมื่อให้สัญญาณป้อนเข้า  $R(z)$  แบบสเตป ( $z/(z - 1)$ ) จะได้ค่าสัญญาณออกที่ส่งให้กับระบบ ที่เวลาการสุ่มต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} C(z) &= R(z)M(z) \\ &= \left(\frac{z}{z-1}\right) \left(\frac{1}{1+c} \frac{z+c}{z^2}\right) \\ &= \frac{z+c}{(1+c)z(z-1)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

### 3.4 ทดสอบสมการตัวควบคุม

เมื่อได้สมการของระบบ และ ตัวควบคุม แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ว่าสมการที่ได้มีการตอบสนองต่อสัญญาณป้อนเข้าอย่างไร เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ของระบบลงในสมการที่ 3.24 จะได้สมการตัวควบคุมในรูปของค่าตัวเลข ดังนี้

$$D_x(z) = \frac{3701.18(z - 0.2499)}{z + 0.388} \quad (3.27)$$

$$D_y(z) = \frac{3676.6(z - 0.2449)}{z + 0.386} \quad (3.28)$$

$$D_z(z) = \frac{596.445(z - 0.9949)}{z + 0.4996} \quad (3.29)$$

และจากสมการที่ 3.26 จะได้สัญญาณของระบบที่ควบคุมแล้วจากสัญญาณป้อนเข้าแบบ สเตป ดังนี้

$$C_x(z) = 0.612 \frac{z + 0.6339}{z(z - 1)} \quad (3.30)$$

$$C_y(z) = 0.614 \frac{z + 0.629}{z(z - 1)} \quad (3.31)$$

$$C_z(z) = 0.5004 \frac{z + 0.998}{z(z - 1)} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ 3.30 ถึง 3.32 เมื่อกระจายค่าของสมการ จะได้สัญญาณที่เวลาการสุ่ม ต่าง ๆ ดังนี้

$$C_x(z) = 0.612 z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots$$

$$C_y(z) = 0.614 z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots$$

$$C_z(z) = 0.5004 z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots$$

จะเห็นว่าระบบจะเข้าสู่ค่าผิดพลาดเป็นศูนย์หรือเท่ากับสัญญาณที่ป้อนเข้าที่เวลาการสุ่มครั้งที่สอง สำหรับสัญญาณป้อนเข้าแบบ สเตป โดยดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์หน้า  $z$  แต่ละตัว ค่ายกกำลังคือครั้งที่เวลาการสุ่มใด ๆ

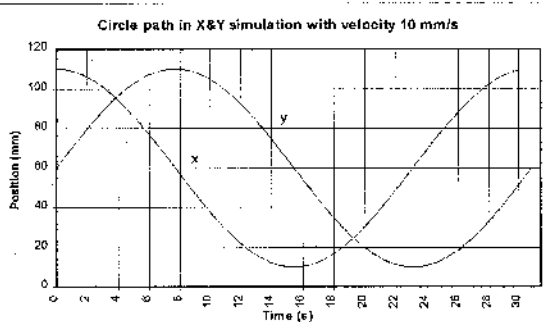
### 3.5 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยทางเดินที่สร้างขึ้น

#### 1 ทดสอบแบบจำลองแกน x และ y

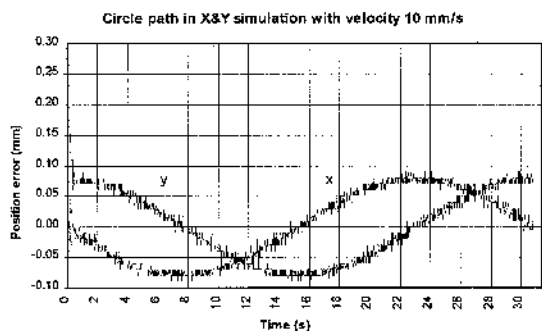
ทดสอบด้วยการเคลื่อนที่แบบวงกลมซึ่งมีการเคลื่อนที่กลับทิศทางไปมาทั้ง 2 แกน โดยการสร้างทางเดินวงกลมแบบความเร็วคงที่ ซึ่งสร้างจากเส้นตรงที่มีขนาดเล็กลงมาต่อกันเป็นรูปวงกลม ทดสอบโดยการให้ชุดเคลื่อนที่เคลื่อนไปตามเส้นทางแบบวงกลมที่สร้างไว้ แล้วบันทึก

ผลของตำแหน่งที่เคลื่อนที่เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.8-3.13 ซึ่งเคลื่อนที่แบบวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วตามเส้นทาง 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

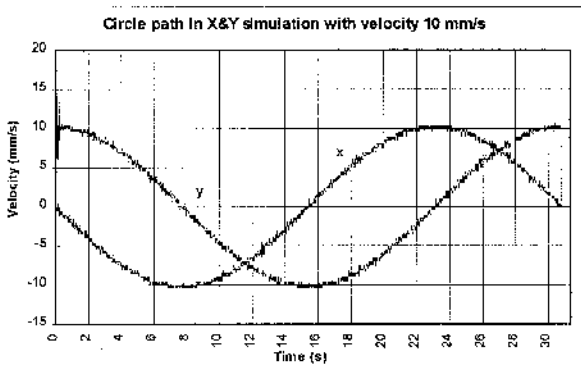
รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งที่เคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแนวแกน x และ y เทียบกับเวลา จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดมีค่าสูงสุดบริเวณช่วงแรกของการเคลื่อนที่อยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตรในแนวแกน y และมีค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของทั้ง 2 แกนอยู่ในช่วงประมาณ  $\pm 0.08$  มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.10-3.13 ซึ่งแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่ พบว่าค่าผิดพลาดของความเร็วในแนวแกน y จะมากกว่าในแนวแกน x โดยค่าผิดพลาดความเร็วของแกน x อยู่ในช่วง  $\pm 0.5$  มิลลิเมตรต่อวินาที และ y อยู่ในช่วง  $\pm 1$  มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนค่าผิดพลาดสูงสุดของความเร็วมีค่า 8 มิลลิเมตรต่อวินาทีในแนวแกน y



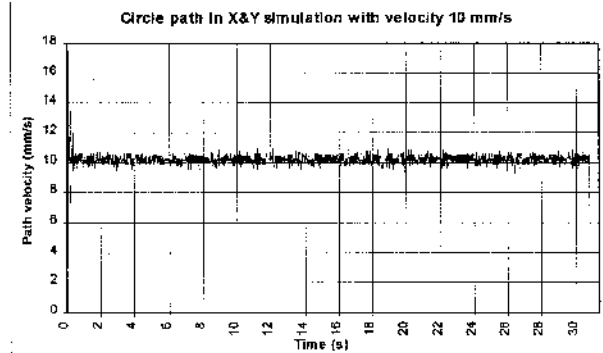
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



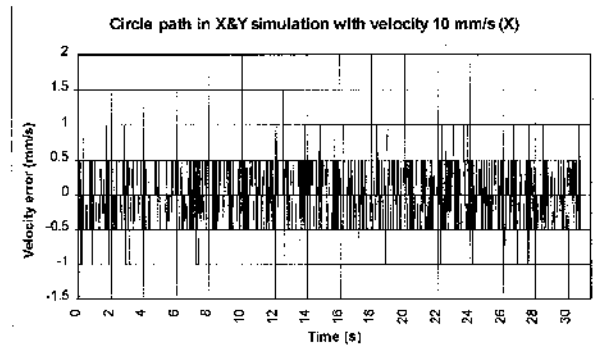
รูปที่ 3.9 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



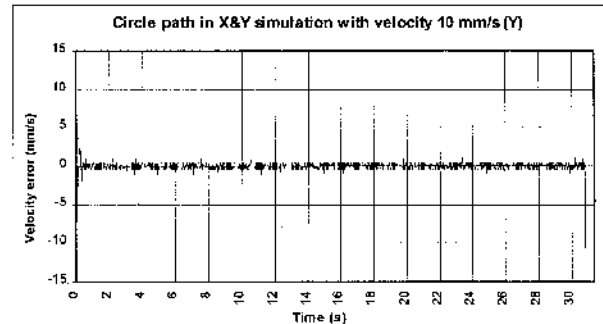
รูปที่ 3.10 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



รูปที่ 3.11 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



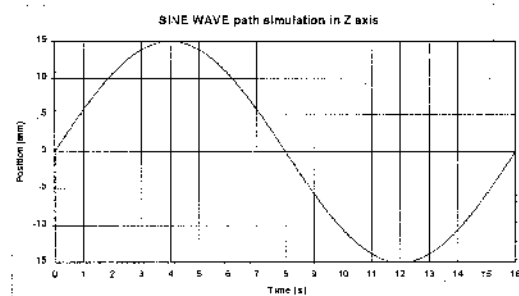
รูปที่ 3.12 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แกน x



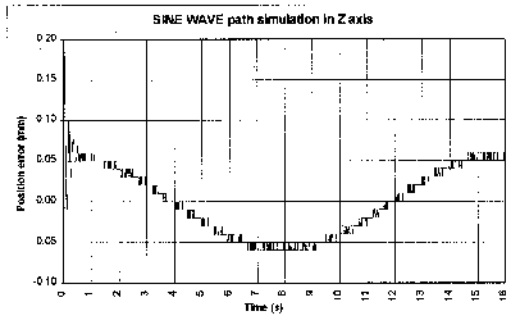
รูปที่ 3.13 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แกน y

## 2. ทดสอบแบบจำลองแกน z

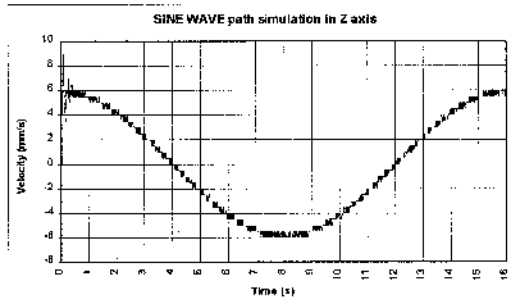
ทำการทดสอบด้วยการเคลื่อนที่รูปคลื่นไซน์ (sine wave) 1 ลูกคลื่น ด้วยขนาดความสูง 15 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างตำแหน่งโดยเฉลี่ยประมาณ 0.075 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.14-3.17



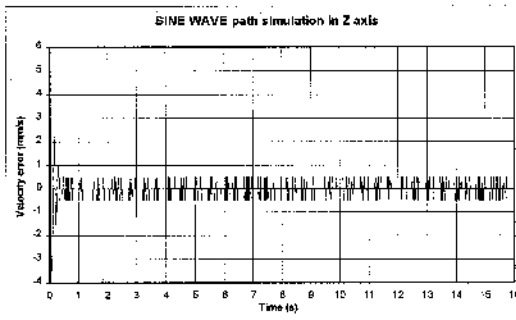
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งตามทางเดินแบบ sine ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน z



รูปที่ 3.15 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบ sine ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน z



รูปที่ 3.16 ความเร็วตามทางเดินแบบ sine ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน z



รูปที่ 3.17 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบ sine ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน z

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 จะเห็นว่าตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงจะผิดพลาดจากค่าอ้างอิงอยู่ประมาณ 0.18 มิลลิเมตรในช่วงเริ่มต้น และค่าผิดพลาดของตำแหน่งขณะเคลื่อนที่มีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 0.05$  มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งแสดงความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็ว จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะเกิดการแกว่งในช่วงแรกสูงถึง 6 มิลลิเมตรต่อวินาที และลดลงอยู่ในช่วง  $\pm 0.5$  มิลลิเมตรต่อวินาที ตลอดระยะเวลา

จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโต๊ะเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อย และค่าผิดพลาดสูงสุดจะอยู่ที่เฉพาะช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จากนั้นค่าผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็ว

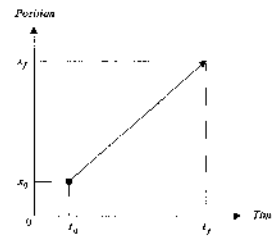
#### 4) การสร้างทางเดินสำหรับเครื่องติดตามคอนทัวร์

##### 4.1 การสร้างทางเดินแบบเส้นตรงความเร็วคงที่

###### 1. ทางเดินเส้นตรงแบบแกนเดียว

การสร้างคำสั่งทางเดินของชุดเคลื่อนที่จำเป็นต้องควบคุมความเร็วให้คงที่ในขณะที่เคลื่อนที่ไปยังจุดที่กำหนด วิธีการสร้างโดยใช้ความเร็วคงที่ตลอดเส้นทางแบบเส้นตรง (Straight line) เป็นวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถทำให้ชุดเคลื่อนที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วตามที่กำหนด โดยการแบ่ง

ระยะทางที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยระยะทางที่มีขนาดเท่า ๆ กันหลายจุดต่อกัน ซึ่งสามารถสร้างได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เทียบกับเวลา

พิจารณารูปที่ 4.1 เมื่อต้องการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง  $x_0$  ที่เวลา  $t_0$  ไปยังจุดสิ้นสุด  $x_f$  ที่เวลา  $t_f$  ด้วยความเร็ว  $V$  โดยใช้อัตราการสุ่มเวลา  $T$  เราสามารถคำนวณจำนวนจุดที่จะแบ่งในการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$N = \frac{x_f - x_0}{VT} \quad (4.1)$$

เมื่อทราบจำนวนจุดในการแบ่งแล้ว เราสามารถทราบระยะเคลื่อนที่แต่ละจุดได้ดังนี้

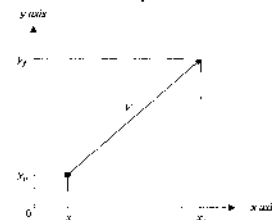
$$\Delta x = \frac{(x_f - x_0)}{N} \quad (4.2)$$

จากนั้นจึงนำระยะที่ได้ไปสร้างเป็นชุดคำสั่งต่อไปนี้ได้ดังนี้

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (4.3)$$

###### 2. ทางเดินเส้นตรงแบบ 2 แกน

ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนที่พร้อมกัน 2 แกน หรือเส้นทางที่เคลื่อนที่มีลักษณะไม่ขนานกับแกนใดแกนหนึ่ง เราสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.2 กำหนดให้เส้นทางเคลื่อนที่ที่เริ่มต้นจากจุด  $x_0, y_0$  เคลื่อนไปด้วยความเร็วคงที่  $V$  เป็นเส้นตรงไปยังจุด  $x_f, y_f$



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแกน x และ y ด้วยความเร็ว  $V$

สามารถหาจำนวนจุดในการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$N = \frac{[(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2]^{1/2}}{VT} \quad (4.4)$$

จะได้ระยะเคลื่อนที่แต่ละช่วงเวลาการสุ่มหรือแต่ละจุดดังนี้

$$\Delta x = \frac{(x_f - x_0)}{N} \quad (4.5)$$

$$\Delta y = \frac{(y_f - y_0)}{N} \quad (4.6)$$

ชุดคำสั่งที่ใช้ในการสั่งให้เคลื่อนที่

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (4.7)$$

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y \quad (4.8)$$

ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ตามทางเดินมีความเร็วคงที่ตามที่กำหนดไว้ตลอดระยะเวลา

#### 4.2 การสร้างการเคลื่อนที่จากตำแหน่งไปตำแหน่งโดยใช้ฟังก์ชัน Spline (Point to Point Motion Generation using Spline Functions)



ความแม่นยำและถูกต้องในระบบควบคุมตำแหน่งทั้งหลาย ชุดขับเคลื่อนทุกชนิดย่อมมีขีดจำกัดความเร็ว และความเร่ง ฟังก์ชันสปлайнกำลังสาม (cubic spline) เป็นวิธีสร้างชุดคำสั่งแบบตำแหน่งไปยังตำแหน่งอีกชนิดหนึ่งที่มีความสะดวก และสามารถสร้างชุดคำสั่งที่เหมาะสมกับขีดจำกัดต่างๆ ได้

พิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นว่ามีการเคลื่อนที่ในเส้นทางอยู่ 3 ช่วง ช่วงแรกจาก  $t_0$  ถึง  $t_1$  เป็นช่วงความเร่งคงที่ ( $A$ ) ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าที่กำหนดและเคลื่อนที่ต่อไปในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงความเร็วคงที่ ( $V$ ) ความเร่งจะมีค่าเป็นศูนย์จนถึงเวลา  $t_2$  จึงเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงคงที่ ( $-A$ ) ความเร็วจะลดลงจนถึงเวลา  $t_3$  ค่าความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งได้ระยะทางตามที่กำหนด

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad (4.9)$$

$$\Delta s_1 = \frac{A\Delta t_1^2}{2} = x_1 - x_0 \quad (4.10)$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = \Delta t_1 \quad (4.11)$$

$$\Delta s_3 = \frac{V^2}{2A} = x_f - x_2 \quad (4.12)$$

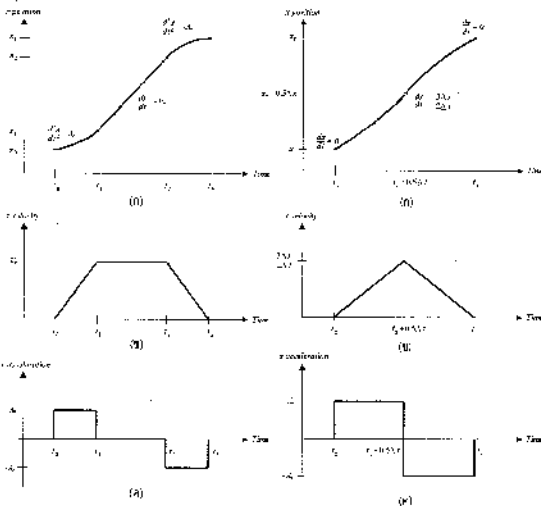
$$\Delta s_2 = x_2 - x_1 = x_f - \Delta s_1 - \Delta s_3 \quad (4.13)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{\Delta s_2}{V} \quad (4.14)$$

โดยทั่วไปจะให้ระยะทางส่วนแรก  $\Delta s_1$  เท่ากับส่วนที่สาม  $\Delta s_3$  เราสามารถหาระยะทางส่วนที่สองได้จากระยะทางทั้งหมดลบออกด้วยส่วนแรกและส่วนที่สาม

กำหนดให้

- $x_0$  เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา  $t_0$
- $x_1$  เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่เวลา  $t_1$
- $x_2$  เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงคงที่ที่เวลา  $t_2$
- $x_f$  เป็นตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วเป็นศูนย์ที่เวลา  $t_3$



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่  
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบไม่มีช่วงความเร็วคงที่  
(ก) แสดงระยะทางที่เคลื่อนที่ กับ เวลาที่ใช้ (ข) แสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ กับ เวลาที่ใช้ (ค) แสดงความเร่งในการเคลื่อนที่ กับ เวลาที่ใช้  
ในกรณีนี้ช่วงเวลา  $\Delta t_2$  มีค่าเป็นลบจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$|\Delta x| < \frac{V^2}{A} \quad (4.15)$$

แสดงว่า ระยะทางที่เคลื่อนที่ เมื่อยังพอที่จะเคลื่อนด้วยความเร็วสูงสุด กรณีเช่นนี้จะไม่มีช่วงความเร็วคงที่ ดังรูปที่ 4.4 สมการของเวลา และระยะทางจะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\Delta x = x_f - x_0 \quad (4.16)$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad (4.17)$$

$$\Delta s_1 = \frac{A\Delta t_1^2}{2} = x_1 - x_0 \quad (4.18)$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 \quad (4.19)$$

$$\Delta s_3 = \Delta s_1 \quad (4.20)$$

$$\Delta t_2 = 0 \quad (4.21)$$

$$\Delta s_2 = 0 \quad (4.22)$$

จะเห็นว่าการเคลื่อนที่เริ่มจากตำแหน่งเริ่มต้น  $x_0$  ที่เวลา  $t_0$  ด้วยความเร่งคงที่จนได้ระยะทางครึ่งหนึ่งของระยะทางทั้งหมด จึงเริ่มเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความหน่วงคงที่ จนถึงจุดปลายที่เวลา  $t_1$

วิธีการเคลื่อนที่แบบสปلاینนี้ จะทำให้อุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ เริ่มต้นเคลื่อนที่โดยไม่เกิดการ กระชาก และสามารถเร่งความเร็วจนถึงจุดที่อุปกรณ์สามารถจะทำได้ แต่ระยะห่างระหว่างจุดจะมีค่าไม่เท่ากัน เหมือนการสร้างทางเดินแบบเส้นตรง

### 4.3 การสร้างทางเดินแบบวงกลม

ทางเดินแบบวงกลมเป็นรูปแบบหนึ่งของแนวทางเดินที่ถูกนำมาใช้ทางเดินรูปแบบนี้จะเหมาะสมกับวัตถุที่มีรูปร่างแบบทรงกลมหรือมีความโค้งใกล้เคียงกับทรงกลม ข้อมูลที่ต้องนำมาใช้ในการสร้างแนวทางเดินแบบวงกลมคือ

1. จุดศูนย์กลางของวงกลม
2. รัศมีของวงกลม

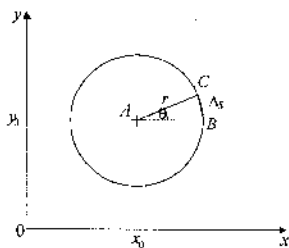
พิจารณารูปที่ 4.5 เป็นการแบ่งส่วนของวงกลมให้เป็นเส้นตรงที่มีขนาดเล็กๆ มาต่อกัน แต่ละส่วนให้มีขนาด  $\Delta s$  เพื่อให้ได้ความเร็วตามที่กำหนดในช่วงเวลาการลุ่ม

จากรูปสามเหลี่ยม ABC

$$AB = AC = r \quad (4.23)$$

$$BC = \Delta s \quad (4.24)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{2 \cdot AB \cdot AC - BC^2}{2 \cdot AB \cdot AC} \right) \quad (4.25)$$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการแบ่งจุดสร้างแนวทางเดินแบบวงกลม  
แทนค่าจากสมการ 4.23 และ 4.24 ลงในสมการ 4.25 จะได้ว่า

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{2r^2 - \Delta s^2}{2r^2} \right) \quad (4.26)$$

จากสมการที่ 4.26 เราสามารถนำค่า  $\theta$  ไปคำนวณจุดอ้างอิงตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่เวลาในการลุ่มครั้งที่  $n$  ได้ดังสมการที่ 4.27 และ 4.28 ดังนี้

$$x(n) = r \cos(\theta n) + x_0 \quad (4.27)$$

$$y(n) = r \sin(\theta n) + y_0 \quad (4.28)$$

โดยที่

$x(n)$  คือ ตำแหน่งตามแนวแกน  $x$  ที่เวลาการสุ่มครั้งที่  $n$

$y(n)$  คือ ตำแหน่งตามแนวแกน  $y$  ที่เวลาการสุ่มครั้งที่  $n$

$r$  คือ รัศมีของวงกลม

$x_0$  คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมตามแนวแกน  $x$

$y_0$  คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมตามแนวแกน  $y$

### ความละเอียดในการเก็บข้อมูล

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งในการวัดขนาดของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องติดตามคอนทัวร์นี้คือ ความละเอียดในการเก็บข้อมูลของชิ้นงานแต่ละอัน หรือระยะห่างของตำแหน่งการวัดแต่ละครั้งในการเก็บข้อมูล ความละเอียดของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับทฤษฎีการพิจารณาถึงความต้องการความละเอียดหรือความจำเป็นในการเก็บข้อมูล ถ้าชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความชันของพื้นผิวค่อนข้างมาก ความละเอียดในการเก็บข้อมูลควรจะมาก ถ้าการเปลี่ยนแปลงความชันของพื้นผิวชิ้นงานมีน้อยหรือค่อนข้างราบเรียบ ความละเอียดในการเก็บอาจจะน้อยลงได้ขึ้นอยู่กับความต้องการ สามารถกำหนดความละเอียดของชิ้นงานในการเก็บข้อมูลได้จากความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดผ่าน ชิ้นงาน เนื่องจากคาบเวลาการสุ่มคงที่ ถ้าต้องการความละเอียดมากต้องเคลื่อนหัววัดผ่านชิ้นงานด้วยความเร็วต่ำซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของข้อมูลมีค่าน้อยหรืออีกความหมายหนึ่งคือ จำนวนจุดของตำแหน่งที่วัดบนผิวชิ้นงานมีจำนวนมาก ในทางกลับกันเมื่อไม่ต้องการความละเอียดมากนักก็สามารถทำได้โดยการเคลื่อนที่หัววัดผ่านชิ้นงานด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของการวัดมีค่ามากขึ้น ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความละเอียดของการเก็บข้อมูลแต่ไม่ต้องการเพิ่มหรือลดความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สามารถทำได้จากการเว้นตำแหน่งบางตำแหน่งของการวัดในระหว่างทำการเก็บข้อมูล เราจึงสามารถกำหนดลำดับในการเก็บข้อมูลได้ตามต้องการ ขนาดของชิ้นงานก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่ เมื่อใช้ความละเอียดสูง จำนวนข้อมูลที่ต้องเก็บจะมีจำนวนมากซึ่งจำเป็นต้องใช้เนื้อที่ในหน่วยความจำมาก เวลาที่ใช้ในการเก็บก็จะมาก

### ตัวอย่างการกำหนดความละเอียด

เมื่อให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดผ่านชิ้นงานมีค่า  $V$  ใช้คาบเวลาในการสุ่มค่า  $T$  เคลื่อนที่ในแต่ละครั้งด้วยระยะทาง  $s$  กรณีที่ให้การเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรงความเร็วคงที่ตลอดเส้นทาง เวลาที่ต้องใช้ในการวัดในการเคลื่อนที่ 1 รอบคือ

$$\Delta t = \frac{s}{V} \quad (4.29)$$

จำนวนจุดที่วัดหรือจำนวนครั้งในการสุ่มของการเคลื่อนที่ 1 รอบคือ

$$n = \frac{\Delta t}{T} = \frac{s}{VT} \quad (4.30)$$

จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างจุดที่วัดแต่ละครั้งมีขนาด

$$\Delta x = \frac{s}{n} = VT \quad (4.31)$$

สมมติให้การเคลื่อนที่แต่ละรอบมีระยะทาง 100 มิลลิเมตร อัตราการสุ่ม 0.02 วินาที ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบ

$$\Delta t = \frac{s}{V} = \frac{100}{10} = 10 \text{ วินาที}$$

จำนวนจุดแต่ละรอบ

$$n = \frac{\Delta t}{T} = \frac{10}{0.02} = 500 \text{ จุด}$$

ดังนั้น ระยะห่างระหว่างจุด

$$\Delta x = \frac{s}{n} = \frac{100}{500} = 0.2 \text{ มิลลิเมตร}$$

ในการสุ่มแต่ละครั้งข้อมูลจะมีระยะห่างตามแนวแกนที่เคลื่อนที่เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร ถ้าต้องการให้ระยะทางมีขนาดเล็กลง สามารถทำได้โดยการลดความเร็วลง จำนวนจุดแต่ละรอบก็จะเพิ่มมากขึ้น กรณีที่ต้องการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมแต่ต้องการเพิ่มขนาดของระยะห่างระหว่างจุด ทำได้โดยกำหนดการเก็บข้อมูลจากโปรแกรม ในกรณีตัวอย่างนี้ถ้ากำหนดให้เก็บข้อมูลทุกๆเวลาการสุ่ม 3 ครั้ง ระยะห่างระหว่างจุดจะมีค่า  $3 \times 0.2 = 0.6$  มิลลิเมตร

## 5) ผลการทดลอง

### วิธีการทดลอง

ในการทดสอบการทำงานของโต๊ะเคลื่อนที่  $x, y, z$  สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลักดังนี้

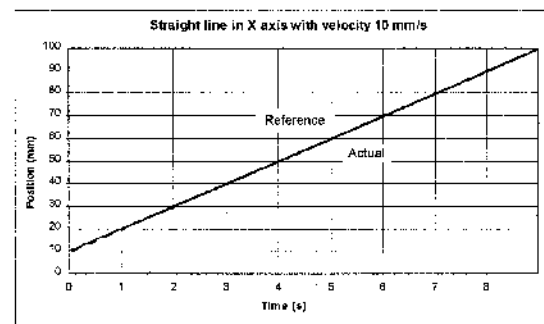
#### 1. การทดสอบการเคลื่อนที่แบบพื้นฐาน

##### 1.1 การเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่

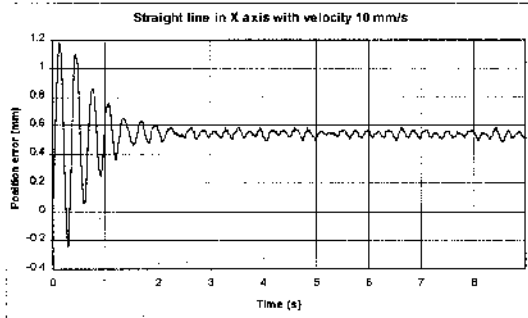
การทดสอบชุดนี้การเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน  $x, y, z$  โดยทำการเคลื่อนที่ที่ละแกนด้วยความเร็วคงที่ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่ แล้วบันทึกตำแหน่งในการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนดไว้ ผลการทดลองในแต่ละแกนเป็นดังที่แสดงต่อไปนี้

##### 1.1.1 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน $x$

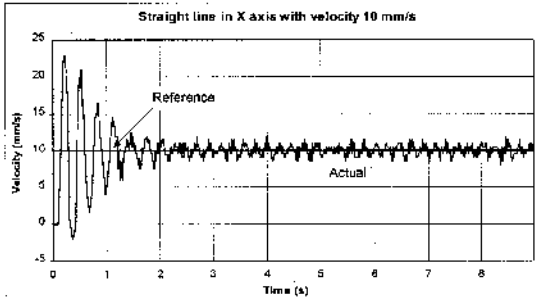
ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  เป็นระยะทาง 90 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วคงที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  ที่เวลาต่างๆ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.1 นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก, ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ



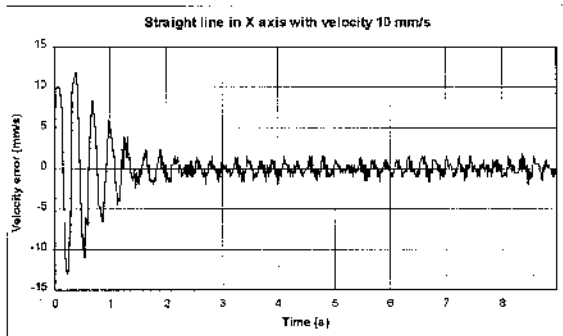
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน  $x$  ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.2 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน x ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.3 ความเร็วทางเดินเส้นตรงตามแกน x ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.4 ค่าผิดพลาดของความเร็วทางเดินเส้นตรงตามแกน x ความเร็ว 10 mm/s

จากรูปที่ 5.1 ระยะทางที่เคลื่อนที่ของแกน x มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงที่ป้อนให้จนเกือบจะเป็นเส้นตรงเดียวกัน จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ที่มีความผิดพลาดเล็กน้อย และเริ่มเข้าสู่ค่าอ้างอิงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที และแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่เคลื่อนที่ระหว่างค่าอ้างอิงกับตำแหน่งจริง จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นมีค่าผิดพลาดสูงถึงประมาณ 1.2 มิลลิเมตร และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที โดยค่าผิดพลาดจะอยู่ที่ประมาณ 0.53 มิลลิเมตร จนถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่

พิจารณากราฟความเร็วในรูปที่ 5.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วจะแกว่งในช่วงเริ่มต้นเช่นเดียวกันและเข้าสู่ค่าอ้างอิงคือ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที จากนั้น ค่าผิดพลาดของความเร็วจะมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 1.45$  มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อทดสอบการเคลื่อนที่ตามแกน x ด้วยระยะทาง 90 มิลลิเมตรเท่าเดิม แต่เพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่จาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที จนถึงค่าสูงสุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่เกิดการสั่น จะได้ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วดังแสดงในตารางที่ 5.1

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยและค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่จะมีค่ามากขึ้น แต่ค่าผิดพลาดตำแหน่งสุดท้ายจะมีความลดลงเนื่องจากแรงเฉื่อยมีผลทำให้มีการเคลื่อนที่ต่อไปจากตำแหน่งสุดท้าย เมื่อความเร็ว

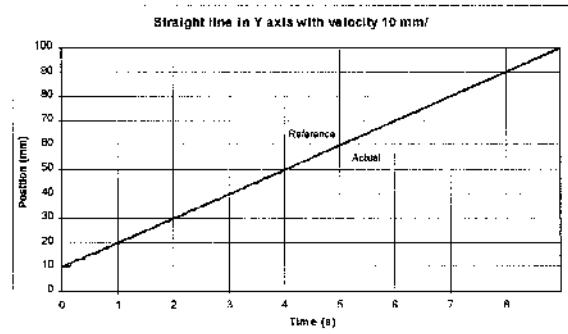
เพิ่มขึ้นแรงเฉื่อยก็จะมีค่ามากขึ้นทำให้จุดเคลื่อนที่แกน x มีค่าเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงสุดท้ายมากขึ้น

ตารางที่ 5.1 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน x

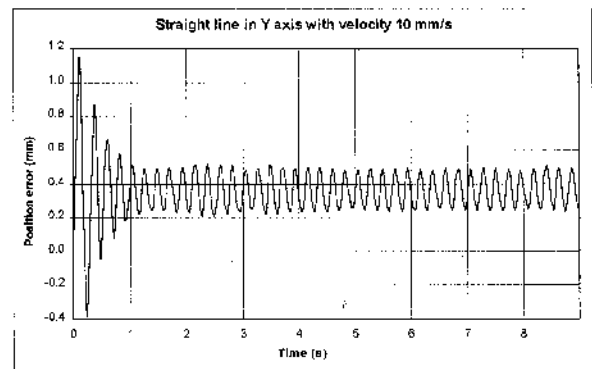
ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.3321	0.1800	0.5275	0.9258	4.3125
5	0.3880	0.1978	0.7100	1.0281	6.9444
10	0.5320	0.1040	1.0980	1.4531	12.9000
12	0.5635	0.1040	1.2140	1.8733	14.6000

### 1.1.2 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน y

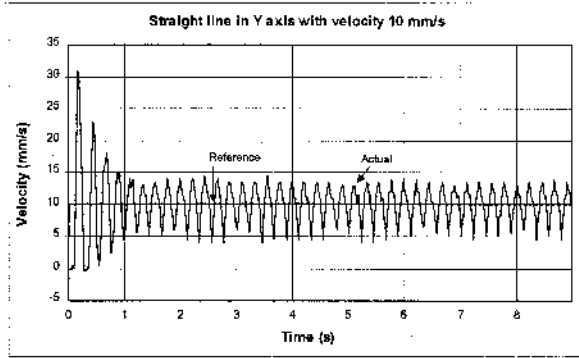
ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน y เป็นระยะทาง 90 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วคงที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่เวลาต่างๆ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.5 นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณ ค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก, ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และ ค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.6, 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ



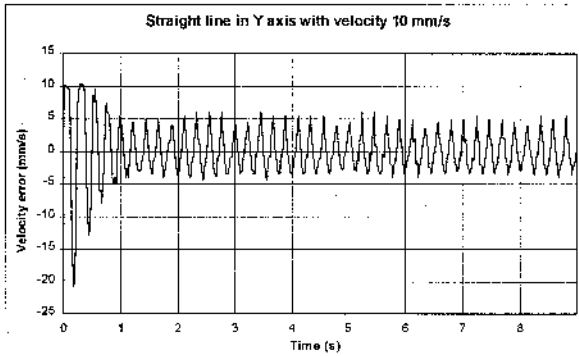
รูปที่ 5.5 ตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน y ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.6 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน y ความเร็ว 10 mm/s พิจารณารูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงตำแหน่งตามทางเดินแบบเส้นตรงตามแกน y ที่เวลาต่างๆ ผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับการเคลื่อนที่ตามแกน x คือตำแหน่งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง แต่ในช่วงเริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนไป โดยค่าของตำแหน่งที่ได้จะเข้าสู่ค่าอ้างอิงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 วินาที ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.6 ซึ่งค่าผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าสูงในช่วงแรกและเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ที่ระยะประมาณ 0.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.7 ความเร็วตามทางเดินเส้นตรงแกน y ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.8 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินเส้นตรงแกน y ความเร็ว 10 mm/s

รูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าผิดพลาดของความเร็ว จะเห็นว่า ค่าความเร็วมีการแกว่งมากในช่วงเริ่มต้น และลดลงในช่วง  $\pm 5$  มิลลิเมตรต่อวินาที ในการทดลองได้เพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน y จาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาทีไปจนถึง 40 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยไม่เกิดการสั่น เนื่องจากชุดเคลื่อนที่ของแกน y มีขนาดเล็กกว่าชุดเคลื่อนที่ของแกน x ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน y ที่ความเร็วต่าง ๆ เป็นดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

จากตาราง 5.2 จะเห็นว่า เมื่อทำการทดสอบที่ความเร็วสูงขึ้น ค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของตำแหน่งและความเร็ว และ ค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งและความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่มีผลกับค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นของการเคลื่อนที่ในแกน y ซึ่งรูปที่ 5.5 - 5.8 แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่จะอยู่ในช่วงแรก ตารางที่ 5.2 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน y

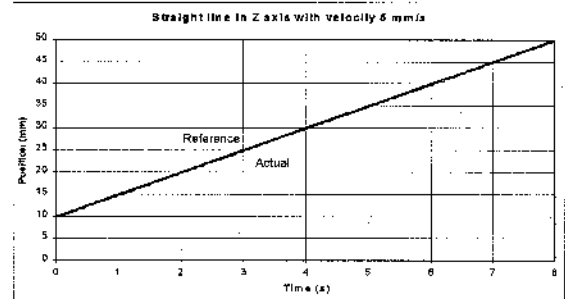
ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.27	0.12	0.82	0.91	13.28
5	0.34	0.18	0.88	0.94	12.50
10	0.47	0.10	1.12	1.17	15.86
20	0.75	-0.04	1.88	2.90	27.67
30	1.05	-0.06	2.46	4.20	30.10
40	1.37	-0.27	3.09	5.51	39.95

### 1.1.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน z

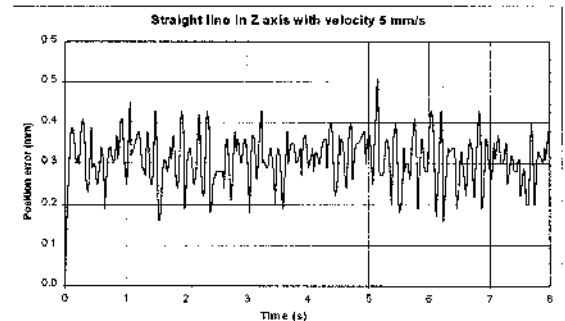
ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน z เป็นระยะทาง 40 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วคงที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่เวลาต่าง ๆ ผลที่ได้

เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.9 นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก, ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.10, 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ

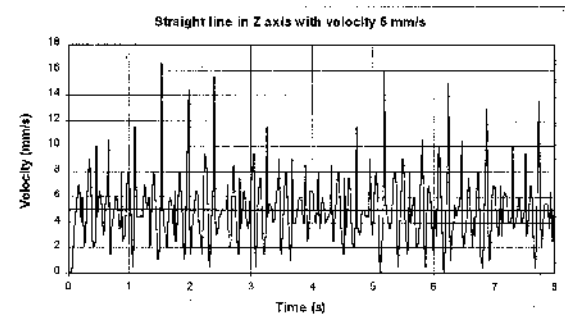
จากรูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน z จะเห็นว่าเส้นกราฟของค่าอ้างอิงและตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงจะใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนคงที่ตลอดระยะทางที่เคลื่อนที่ไป ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ค่าผิดพลาดจะอยู่ที่ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ตั้งแต่ช่วงแรกของการเคลื่อนที่ไปจนถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่ แต่จะมีการแกว่งตัวอยู่ในช่วง  $\pm 0.1$  มิลลิเมตร เมื่อพิจารณารูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงความเร็วของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา จะเห็นว่ามีความผิดพลาดค่อนข้างสูง โดยค่าผิดพลาดสูงสุดมีค่าประมาณ 11.09 มิลลิเมตรต่อวินาที และมีการแกว่งตัวของความเร็วในการเคลื่อนที่มาก ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เวลาต่าง ๆ ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน z ที่ความเร็วต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปในทำนองเดียวกับตารางที่ 5.2 และสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน



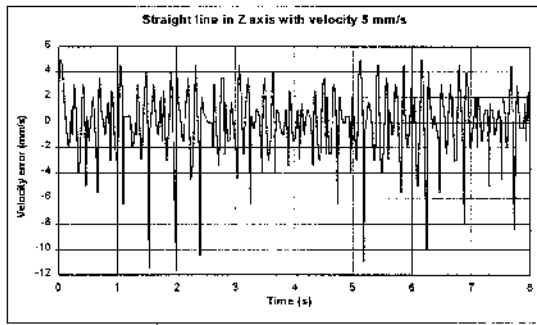
รูปที่ 5.9 ตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.10 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินเส้นตรงตามแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.11 ความเร็วตามทางเดินเส้นตรงแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.12 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินเส้นตรงแกน z ความเร็ว 5 mm/s ตารางที่ 5.3 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน

ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.37	0.24	0.53	1.50	-8.62
5	0.38	0.13	0.57	2.04	-11.09
10	0.42	-0.07	0.68	4.81	-23.00
15	0.59	-0.36	0.95	5.22	-24.42

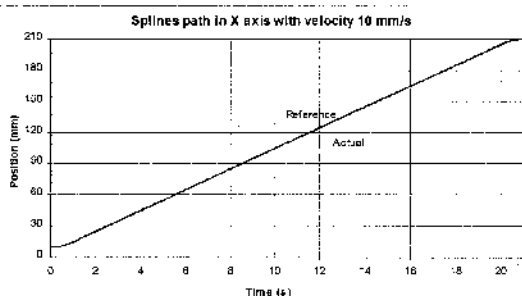
### 1.2 การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงแบบสไปไลน์ (spline)

การเคลื่อนที่แบบสไปไลน์เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ใช้โดยทั่วไปของการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง เนื่องจากมีความเหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์คือ มีช่วงความเร็วคงที่ โดยเพิ่มความเร็วจากหยุดนิ่งไปจนถึงค่าความเร็วที่กำหนด และมีช่วงความหน่วงคงที่โดยลดความเร็วจากค่าที่กำหนดจนหยุดการเคลื่อนที่ ทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปอย่างนิ่มนวล ไม่กระชากและเกิดการสั่นในช่วงแรกเหมือนการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตลอดเส้นทาง

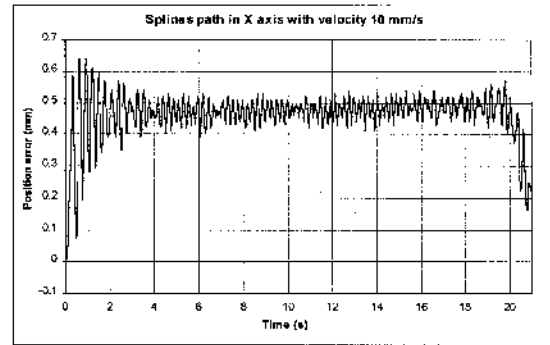
ในการทดสอบการเคลื่อนที่แบบสไปไลน์ ได้ทำการเคลื่อนที่ในแต่ละแนวแกนที่ละแกนที่ความเร็วต่าง ๆ และทำการบันทึกผลของตำแหน่งที่เคลื่อนที่ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

#### 1.2.1 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน x

ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เป็นระยะทาง 205 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วในช่วงคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ที่เวลาต่างๆ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.13 นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และ ค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.14, 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ

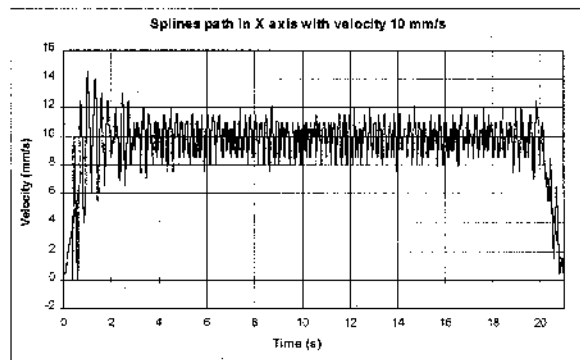


รูปที่ 5.13 ตำแหน่งทางเดินสไปไลน์แกน x ความเร็วช่วงคงที่เท่ากับ 10 mm/s

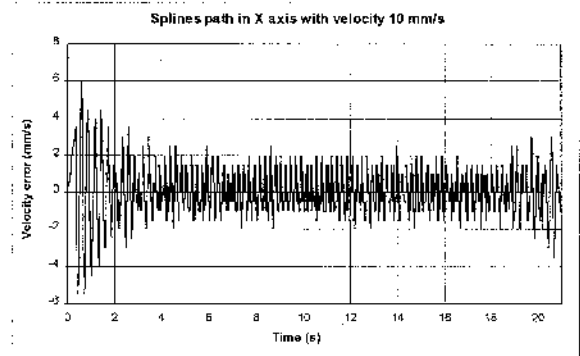


รูปที่ 5.14 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินสไปไลน์แกน x ความเร็วช่วงคงที่เท่ากับ 10 mm/s

จากรูปที่ 5.13 แสดงตำแหน่งตามทางเดินแบบสไปไลน์ที่เวลาต่างๆ เส้นกราฟของตำแหน่งจริงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงตลอดระยะทาง เมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ จะเห็นว่า ค่าผิดพลาดเริ่มต้นมีค่าประมาณ 0.65 มิลลิเมตร และแกว่งตัวลดลงมาอยู่ที่ 0.48 มิลลิเมตรในช่วงความเร็วคงที่ ส่วนในช่วงสุดท้ายของการเคลื่อนที่ ค่าผิดพลาดจะลดลงมาอยู่ที่ 0.2 มิลลิเมตร และจากรูปที่ 5.15 และ 5.16 ซึ่งแสดงความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่ จะเห็นว่าค่าผิดพลาดสูงสุดของความเร็วจะอยู่ที่ช่วงแรกของการเคลื่อนที่ และแกว่งตัวอยู่ในช่วง  $\pm 2$  มิลลิเมตรต่อวินาทีในช่วงความเร็วคงที่ เมื่อเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่แบบสไปไลน์ กับการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่ จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่แบบสไปไลน์จะน้อยกว่าแบบความเร็วคงที่



รูปที่ 5.15 ความเร็วตามทางเดินแบบสไปไลน์แกน x ความเร็วช่วงคงที่เท่ากับ 10 mm/s



รูปที่ 5.16 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบสไปไลน์แกน x ความเร็วช่วงคงที่เท่ากับ 10 mm/s

ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วสำหรับการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง

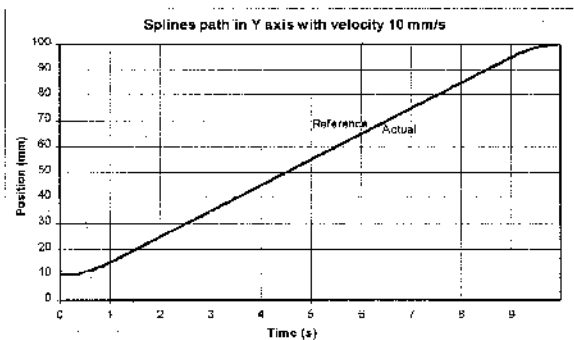
และความเร็วโดยเฉลี่ย และค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วสูงสุด  
มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.4 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน x  
สำหรับทางเดินแบบสไปร์น

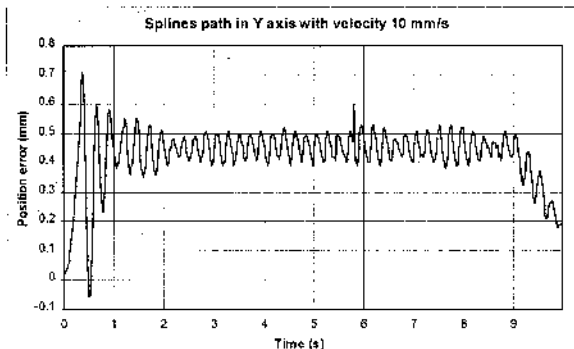
ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.32	0.23	0.45	0.63	2.62
5	0.33	0.23	0.46	0.73	3.27
10	0.43	0.19	0.55	0.96	4.12
20	0.56	0.17	0.84	1.47	4.76
30	0.59	0.20	1.05	1.18	4.55
40	1.05	0.15	1.55	2.34	10.62
50	1.12	0.15	2.17	2.98	16.00

### 1.2.2 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน y

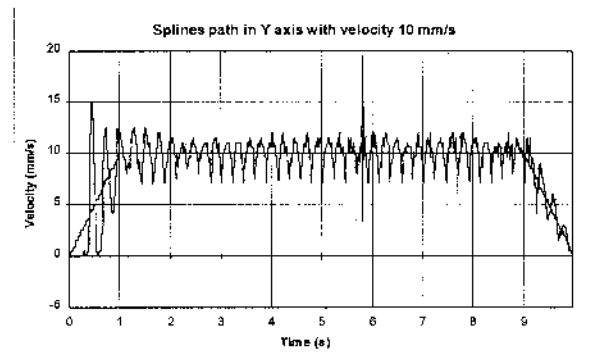
ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน y เป็นระยะทาง 90 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วในช่วงคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่เวลาต่าง ๆ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.17 นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก, ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และ ค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.18, 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ



รูปที่ 5.17 ตำแหน่งทางเดินสไปร์นตามแกน y ความเร็ว 10 mm/s

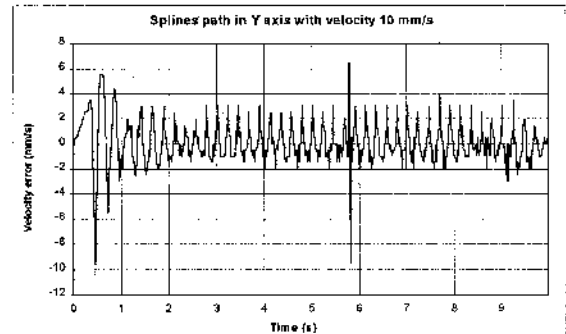


รูปที่ 5.18 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินสไปร์นตามแกน y ความเร็ว 10 mm/s



รูปที่ 5.19 ความเร็วตามทางเดินสไปร์นแกน y ความเร็ว 10 mm/s

จากรูปที่ 5.17 ซึ่งแสดงตำแหน่งตามทางเดินแบบสไปร์นที่เวลาต่างๆ ของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y จะเห็นว่า เส้นกราฟของตำแหน่งจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงจึงไม่สามารถบอกค่าผิดพลาดได้ชัดเจนนัก เมื่อพิจารณาค่าผิดพลาดจากรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่อยู่ที่ประมาณ 0.7 มิลลิเมตร และลดลงมาอยู่ที่ 0.45 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที ค่าผิดพลาดจะแกว่งตัวอยู่ในช่วง  $\pm 0.05$  มิลลิเมตร และในช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ ค่าผิดพลาดจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 0.2 มิลลิเมตร พิจารณารูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งแสดงความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่ จะเห็นว่าค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นยังมีค่าสูงกว่าช่วงอื่นของการเคลื่อนที่ เนื่องจากแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดเคลื่อนที่ แต่ค่าผิดพลาดของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบสไปร์นนี้จะน้อยกว่าการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่



รูปที่ 5.20 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินสไปร์นแกน y ความเร็ว 10 mm/s

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ จะเห็นว่า ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วโดยเฉลี่ย และค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.5 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน y  
สำหรับทางเดินแบบสไปร์น

ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.26	0.15	0.56	0.59	7.34
5	0.31	0.19	0.58	0.60	7.56
10	0.40	0.14	0.68	0.95	10.11
20	0.59	0.13	0.87	1.48	11.99
30	0.76	0.22	1.21	1.85	11.84
40	0.87	0.15	1.57	2.24	13.18

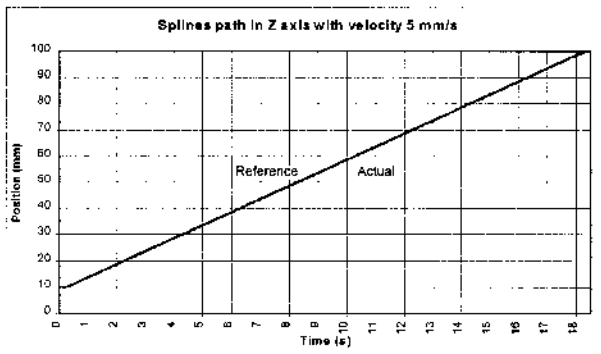
### 1.2.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน z

ในการทดลองนี้ได้ทำการเคลื่อนที่ในแนวแกน z เป็นระยะทาง 90 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วในช่วงเวลาที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการบันทึกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ที่เวลาต่างๆ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.21 นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่บันทึก, ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และ ค่าผิดพลาดของความเร็วที่เวลาต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.22, 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ

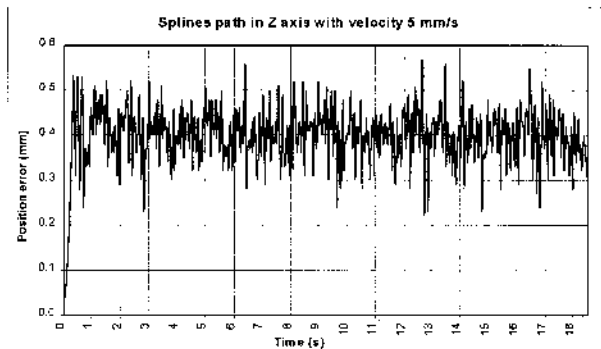
รูปที่ 5.21 แสดงตำแหน่งในการเคลื่อนที่แบบสไปรัลของแกน z จะมีลักษณะเหมือนกับกราฟแสดงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแนวแกน x และ y คือค่าจริงค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง เมื่อพิจารณารูปที่ 5.22 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ จะเห็นว่าค่าผิดพลาดจะอยู่ที่ 0.4 มิลลิเมตร แกว่งตัวในช่วง  $\pm 0.1$  มิลลิเมตร ตั้งแต่เริ่มต้นการเคลื่อนที่จนถึงจุดสุดท้าย ค่าผิดพลาดจะอยู่ที่ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร จะสังเกตเห็นว่า การแกว่งตัวของค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่เคลื่อนที่มีค่าค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณากราฟของความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่จากรูปที่ 5.23 และ 5.24 จะเห็นว่า ค่าผิดพลาดของความเร็วมีมาก การแกว่งตัวอยู่ในช่วงกว้าง เหมือนกับการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่

เมื่อทำการทดลอง โดยเพิ่มความเร็วของการเคลื่อนที่ ในช่วงความเร็วคงที่จาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปจนถึง 15 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.6

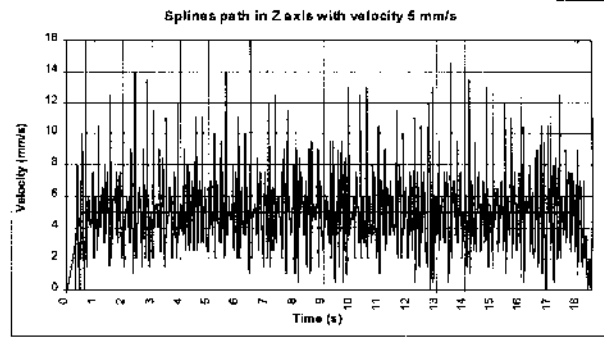
จากตารางที่ 5.6 พบว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วโดยเฉลี่ย และค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งและความเร็ว มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าผิดพลาดกับค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่ จะเห็นว่าค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยและค่าผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่แบบสไปรัลจะมีค่าน้อยกว่า



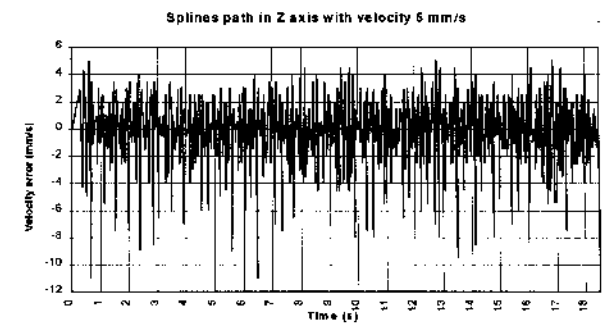
รูปที่ 5.21 ตำแหน่งทางเดินสไปรัลตามแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.22 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งทางเดินสไปรัลตามแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.23 ความเร็วตามทางเดินสไปรัลแกน z ความเร็ว 5 mm/s



รูปที่ 5.24 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินสไปรัลแกน z ความเร็ว 5 mm/s

ตารางที่ 5.6 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน z สำหรับทางเดินแบบสไปรัล

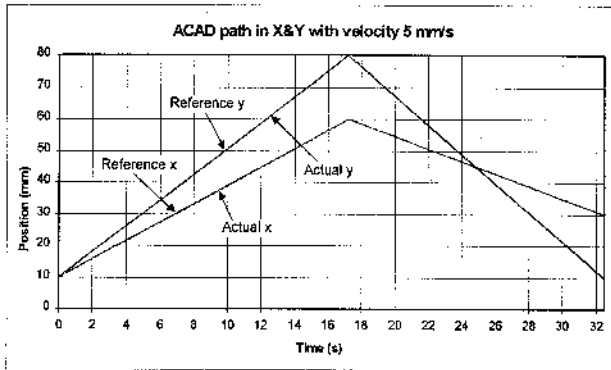
ความเร็ว mm/s	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
	เฉลี่ย mm	จุดสุดท้าย mm	ค่าสูงสุด mm	เฉลี่ย mm/s	ค่าสูงสุด mm/s
3	0.30	0.30	0.47	1.46	-9.92
5	0.40	0.34	0.61	1.84	-10.50
10	0.42	0.39	0.70	3.38	-19.02
15	0.42	0.35	0.82	5.09	-28.70

### 1.3 การเคลื่อนที่แบบหักมุมในแนวแกน x และ y

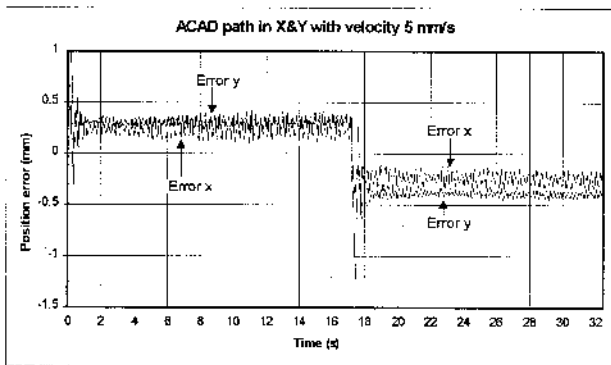
การเคลื่อนที่แบบหักมุมนี้เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่เพื่อหาค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่กลับทิศทางของชุดเคลื่อนที่ซึ่งพบมากในการเคลื่อนที่ทั่วไป และได้ทดสอบโดยการเคลื่อนที่พร้อมกันในแนวแกน x และ y และเคลื่อนที่ที่กลับพร้อมกันทั้ง 2 แกนทำให้ได้รูปแบบซึ่งมีการหักมุมทั้ง 2 แกน ทั้งนี้ใช้การป้อนตำแหน่งแบบความเร็วคงที่ เนื่องจากต้องการให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในช่วงของการหักมุม ผลที่ได้จากการทดลองแต่ละแกนแสดงไว้ในรูปที่ 5.25-5.30 โดยที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เป็น 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะทางตามแกน x เคลื่อนที่ไปทางบวกเป็น ระยะ 50 มิลลิเมตร และเคลื่อนที่กลับเป็นระยะ 30 มิลลิเมตร ส่วนแกน y เคลื่อนที่ทางบวกระยะ 70 มิลลิเมตร และเคลื่อนที่กลับด้วยระยะ 70 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.25 ซึ่งแสดงตำแหน่งที่เคลื่อนที่อ้างอิงกับค่าจริงของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y จะสังเกตเห็นค่าผิดพลาดตำแหน่งที่ช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ และตรงตำแหน่งที่มีการหักมุม ซึ่งเกิดจากแบคแลช (Back Lash) ของชุดเฟืองทด และสามารถเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 5.26 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ จะเห็นว่า การแกว่งตัวในช่วงหักมุมจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดประมาณ 1.5

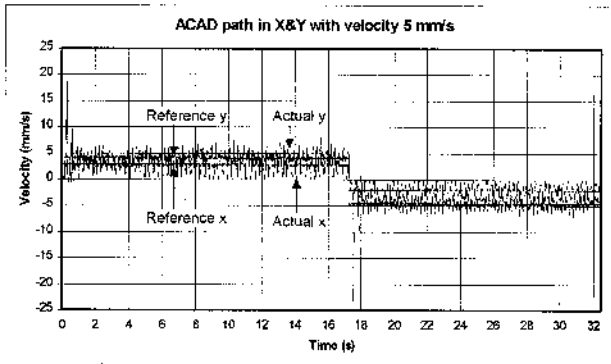
มิลลิเมตร ในช่วงที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ค่าผิดพลาดของแกน x จะอยู่ที่ค่าประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ส่วนแกน y จะมีค่าประมาณ 0.35 มิลลิเมตร ค่าผิดพลาดในแนวแกน x จะน้อยกว่าในแนวแกน y เนื่องจากความเร็วในแนวแกน y มีค่ามากกว่า



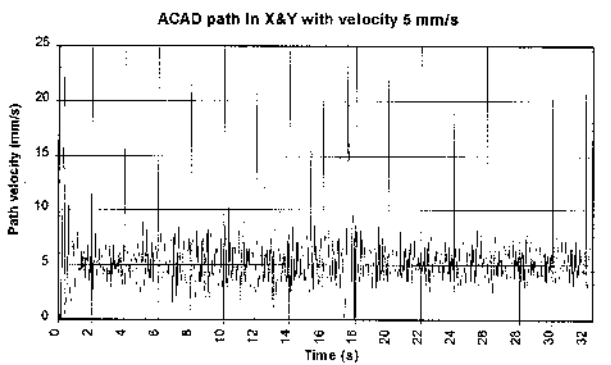
รูปที่ 5.25 ตำแหน่งตามทางเดินแบบหักมุม แกน x และ y



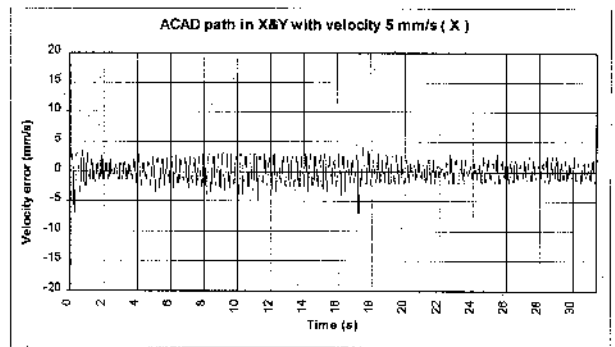
รูปที่ 5.26 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบหักมุม แกน x และ y



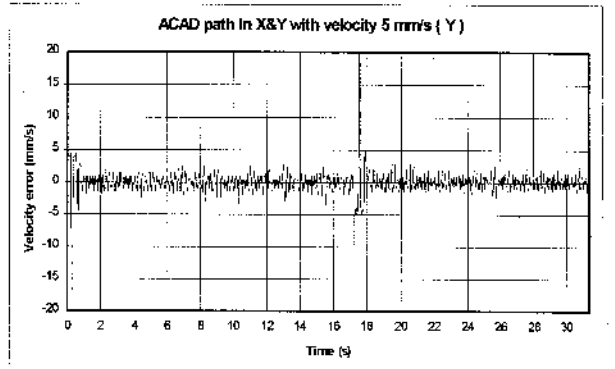
รูปที่ 5.27 ความเร็วตามทางเดินแบบหักมุม แกน x และ y



รูปที่ 5.28 ความเร็วตามทางเดินแบบหักมุม



รูปที่ 5.29 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบหักมุมแกน x



รูปที่ 5.30 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบหักมุมแกน y

เมื่อพิจารณากราฟของความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็วรูปที่ 5.27-5.30 พบว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะแกว่งอยู่ในช่วง  $\pm 3$  มิลลิเมตรต่อวินาที และมีค่ามากเมื่อเกิดการเคลื่อนที่แบบหักมุม ค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่แบบหักมุมที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างๆ เป็นดังแสดงในตารางที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วโดยเฉลี่ยและค่าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

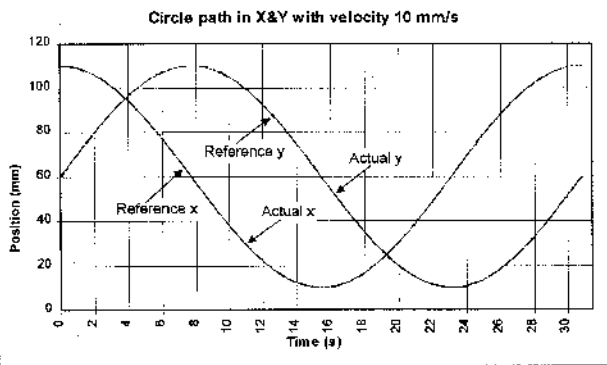
ตารางที่ 5.7 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน x, y สำหรับทางเดินแบบหักมุม

ความเร็ว	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง						ค่าผิดพลาดความเร็ว			
	เฉลี่ย		จุดสุดท้าย		ค่าสูงสุด		เฉลี่ย		ค่าสูงสุด	
	x (mm)	y	x (mm)	y	x (mm)	y	x (mm/s)	y	x (mm/s)	y
3	0.26	0.29	-0.15	-0.15	0.45	-0.97	0.75	0.66	-4.42	14.64
5	0.28	0.36	-0.19	-0.12	1.24	1.22	1.89	1.04	-7.32	20.40
10	0.38	0.48	-0.13	-0.04	-0.10	-1.76	2.89	2.00	-18.50	31.50

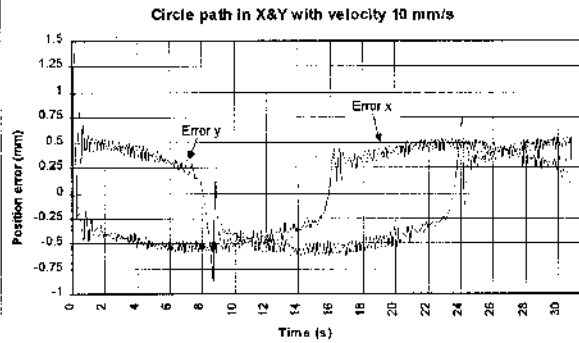
#### 1.4 การเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวแกน x และ y

การเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวแกน x และ y นี้ เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบพื้นฐานอย่างหนึ่งที่ใช้กันมาก และสามารถตรวจสอบการทำงานได้ง่าย เนื่องจากทางเดินมีลักษณะต่อเนื่อง มีการเคลื่อนที่กลับทิศทางไปมาทั้ง 2 แกน ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้สร้างทางเดินรูปวงกลมเป็นแบบความเร็วคงที่ ซึ่งสร้างจากเส้นตรงที่มีขนาดเล็กมาต่อกันเป็นรูปวงกลม ทดสอบโดยการให้ชุดเคลื่อนที่เคลื่อนไปตามเส้นทางแบบวงกลมที่สร้างไว้ แล้วบันทึกผลของตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.31 - 5.36 ซึ่งเคลื่อนที่แบบวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

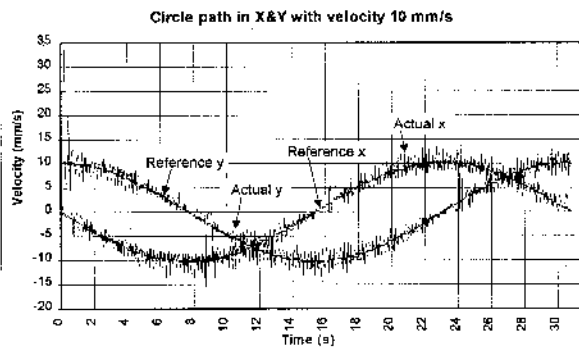




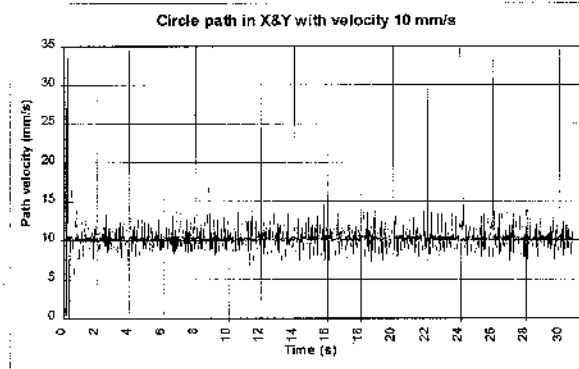
รูปที่ 5.31 ตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลมแกน x และ y



รูปที่ 5.32 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลมแกน x และ y



รูปที่ 5.33 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมแกน x และ y

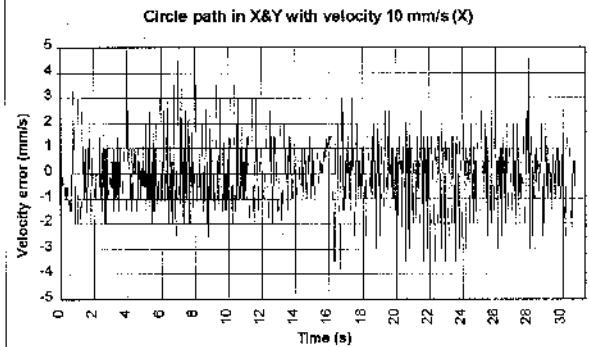


รูปที่ 5.34 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลม

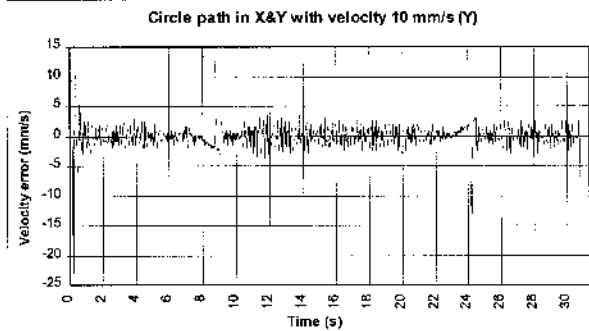
รูปที่ 5.31 แสดงตำแหน่งที่เคลื่อนที่เทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าผิดพลาดจะเกิดขึ้นบริเวณช่วงแรกของการเคลื่อนที่และจุดที่มีการเคลื่อนที่กลับในแต่ละแกน ซึ่งเกิดจากค่าความเสียดทานในแต่ละแกนและค่าแมคแลชของชุดเฟืองทดซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 5.3.2 และมีค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของทั้ง 2 แกนจะอยู่ที่ประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ในช่วงการเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ จากรูปที่ 5.33 - 5.36 ซึ่งแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่ พบว่าค่าผิดพลาดของ

ความเร็วในแนวแกน y จะมากกว่าในแกน x โดยค่าผิดพลาดความเร็วของแกน x และ y อยู่ในช่วง  $\pm 3$  มิลลิเมตรต่อวินาที

เมื่อเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่ จะพบว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วโดยเฉลี่ยและสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.35 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมแกน x



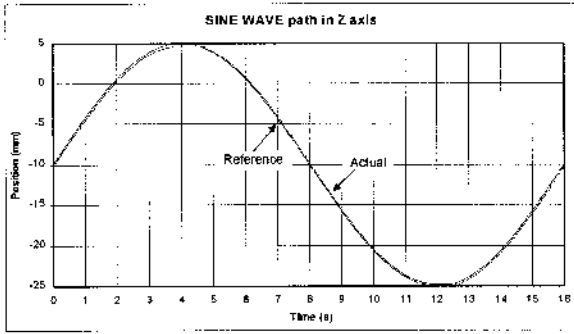
รูปที่ 5.36 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมแกน y

ตารางที่ 5.8 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน x , y สำหรับทางเดินแบบวงกลม

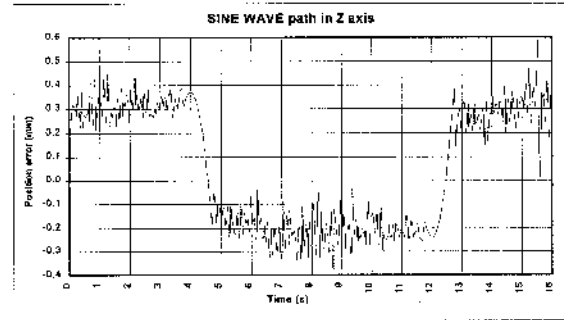
ความเร็ว	ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง				ค่าผิดพลาดความเร็ว					
	เฉลี่ย	จุดสุดท้าย	ค่าสูงสุด	เฉลี่ย	ค่าสูงสุด					
mm/s	x (mm)	y	x (mm)	y	x (mm/s)	y	x (mm/s)	y		
3	0.32	0.27	0.23	0.09	0.64	0.97	0.59	0.50	3.90	17.70
5	0.34	0.32	0.20	0.08	0.49	0.98	0.71	0.66	4.50	16.77
10	0.40	0.42	0.15	0.10	0.58	1.15	0.92	1.26	4.37	30.62

### 1.5 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน z แบบรูปคลื่นไซน์ (sine wave)

เนื่องจากชุดเคลื่อนที่ในแนวแกน z จะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับพื้น ซึ่งจะมีแรงจากน้ำหนักของส่วนที่เคลื่อนที่ตกลงตลอดเวลาจึงทำให้สภาวะในการเคลื่อนที่ขึ้นกับเคลื่อนที่ลงแตกต่างกัน การทดสอบแบบทางเดินเส้นตรงจะทดสอบได้ทิศทางเดียวเท่านั้น จึงทำการทดสอบการเคลื่อนที่ทั้งขึ้นและลงของแกน z ในการเคลื่อนที่ครั้งเดียวด้วยทางเดินแบบซายน์ 1 ลูกคลื่นด้วยขนาดความเร็วสูง 15 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างตำแหน่งโดยเฉลี่ยประมาณ 0.075 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 5.37 - 5.40



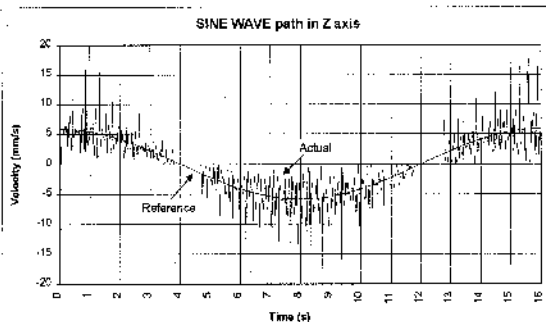
รูปที่ 5.37 ตำแหน่งตามทางเดินแบบ sine แกน z



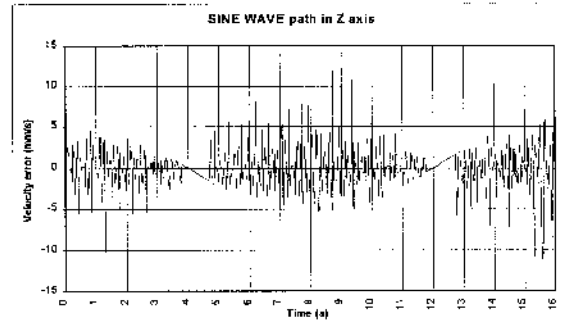
รูปที่ 5.38 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบ sine แกน z

จากรูปที่ 5.37 และ 5.38 จะเห็นว่าตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงจะผิดพลาดจากค่าอ้างอิงอยู่ประมาณ 0.3 มิลลิเมตรและสามารถสังเกตได้ว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ขึ้น จะมากกว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ลง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ขณะเคลื่อนที่ขึ้น จากรูปที่ 5.39 และ 5.40 ซึ่งแสดงความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็ว จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะเกิดการแกว่งในช่วงกว้างพอสมควรขณะเคลื่อนที่

ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่แบบซายน์แสดงไว้ในตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.25 มิลลิเมตร ค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นบางส่วนเกิดจากแรงเสียดทานของชุดเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 5.39 ความเร็วตามทางเดินแบบ sine แกน z



รูปที่ 5.40 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบ sine แกน z ตารางที่ 5.9 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน z สำหรับทางเดินแบบ sine wave

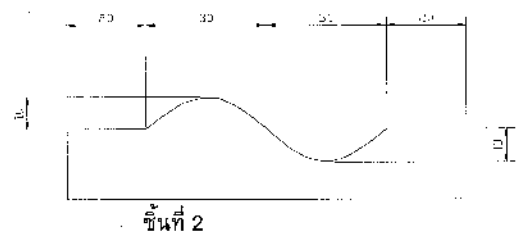
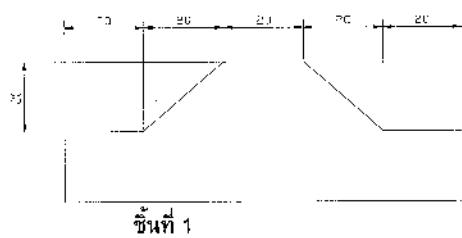
ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง			ค่าผิดพลาดความเร็ว	
เฉลี่ย	จุดสุดท้าย	ค่าสูงสุด	เฉลี่ย	ค่าสูงสุด
mm	mm	mm	mm/s	mm/s
0.25	0.05	0.50	1.57	10.48
0.40	0.34	0.61	1.84	-10.50
0.42	0.39	0.70	3.38	-19.02
0.42	0.35	0.82	5.09	-28.70

## 2. การทดสอบการติดตามคอนทัวร์

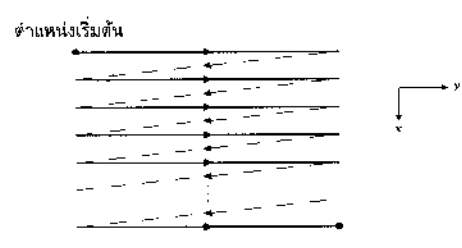
เมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในรูปแบบพื้นฐานต่างๆ แล้ว การทดสอบแบบต่อไปคือการทดสอบการติดตามคอนทัวร์ของชิ้นงานทดสอบเพื่อตรวจสอบการเก็บข้อมูลและค่าผิดพลาดของข้อมูลขนาดของชิ้นงานที่วัดได้ รูปแบบในการเคลื่อนที่เพื่อเก็บข้อมูลของชิ้นงานเกิดจากการนำรูปแบบการเคลื่อนที่แบบพื้นฐานที่ผ่านไปยังขั้นตอน มารวมเป็นรูปแบบที่กำหนดในการ ติดตามคอนทัวร์ของชิ้นงาน แต่รูปแบบต่างๆ ในการเคลื่อนที่สร้างไว้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y เท่านั้น ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน z จะเกิดจากการรักษาระยะห่างระหว่างหัววัดกับผิวของชิ้นงานหรือเกิดจากลักษณะของชิ้นงานนั่นเอง การเคลื่อนที่ในแนวแกน z จึงอาจจะไม่เป็นรูปแบบเหมือนกับการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y ค่าผิดพลาดของข้อมูลของชิ้นงานจะมีมากเท่าใดขึ้นอยู่กับการรักษาระยะห่างของหัววัดให้คงที่ ยิ่งรักษาระยะห่างให้คงที่มากเท่าใด ข้อมูลของชิ้นงานที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดจริงของชิ้นงานมากเท่านั้น

วิธีการทดสอบการติดตามคอนทัวร์ของชิ้นงาน แบ่งตามรูปแบบของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y โดยทำการทดสอบชิ้นงาน 2 ชิ้น ซึ่งมีรูปร่างของพื้นผิวต่างกัน ดังรูปที่ 5.41

2.1 รูปแบบทางเดินทิศทางเดียว (Uni-direction) เป็นรูปแบบที่มีการเคลื่อนที่ทิศทางเดียวทุกครั้งที่ในการเก็บข้อมูล โดยการเคลื่อนที่ที่ขนานกับระนาบแกนใดแกนหนึ่งเป็นเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายพร้อม ๆ กับการเก็บข้อมูลของชิ้นงาน แล้วเคลื่อนที่หัววัดกลับไปตั้งต้นที่จุดเริ่มต้นใหม่ โดยเปลี่ยนตำแหน่งในการเริ่มต้นของเส้นทางแต่ละเส้นเป็นระยะ จะทำให้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลมีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม ความละเอียดของข้อมูลขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่และระยะห่างระหว่างเส้นทางเดินแต่ละเส้น



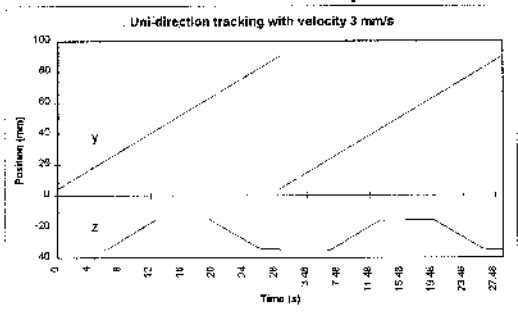
รูปที่ 5.41 ชั้นงานทดสอบ



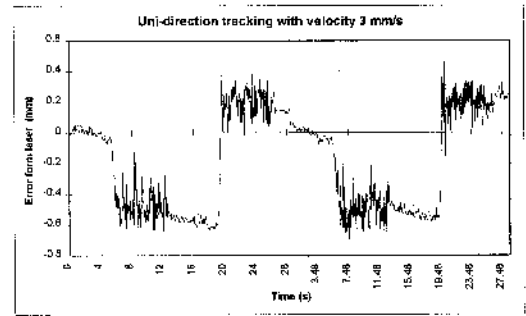
รูปที่ 5.42 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว

รูปที่ 5.42 แสดงรูปแบบทางเดินแบบทิศทางเดียวโดยเคลื่อนที่เก็บข้อมูลทางแกน y และเปลี่ยนระยะทางแกน x เส้นที่บแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อเก็บข้อมูล เส้นประแสดงการเคลื่อนที่ไปเริ่มต้นที่ตำแหน่งใหม่โดยไม่ได้ทำการเก็บข้อมูล ผลจากการทดลองการเก็บข้อมูลด้วยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว แสดงดังรูปที่ 5.43 - 5.46 ดังนี้

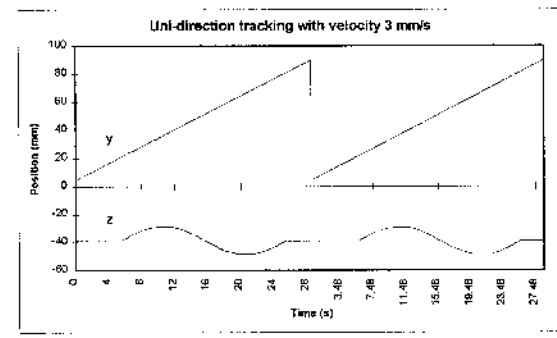
จากรูปที่ 5.43 และ 5.45 แสดงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของกราดตามคอนทัวร์ของชั้นงานทดสอบทั้ง 2 แบบ โดยเคลื่อนที่ตามแกน y ขณะทำการเก็บข้อมูล 2 รอบ จะเห็นว่าระยะทางแกน z จะมีรูปร่างตามแบบของชั้นงานทดสอบ ตรงตำแหน่งที่มีการเริ่มต้นการเคลื่อนที่รอบที่ 2 มีระยะความสูงไม่เท่ากันเนื่องจากความไม่ไต่ระดับของชั้นงาน เมื่อพิจารณารูปที่ 5.44 และ 5.45 ซึ่งแสดงค่าที่วัดได้จากเลเซอร์ จะเห็นว่าในช่วงที่ความชันของชั้นงานมีค่าเป็นบวกหรือระยะความสูงมีค่ามากขึ้น จุดเคลื่อนที่ในแนวแกน z สามารถควบคุมให้ค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.3 ถึง -0.6 มิลลิเมตร และเมื่อความชันมีค่าเป็นลบ สามารถควบคุมอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.40 มิลลิเมตร จะเห็นว่ามีการสั่นในขณะที่ยานเคลื่อนที่ของชั้นงานมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูง เนื่องจากแรงเสียดทานและน้ำหนักของระบบ เมื่อทดลองที่ความเร็วต่างๆ จะได้ค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่วัดได้จากเลเซอร์ดังตารางที่ 5.10 ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้น โดยค่าผิดพลาดที่บันทึกจะคิดจากค่ากลางของค่าผิดพลาดในช่วงที่มีค่าในสภาวะคงที่ของระบบ นอกจากนี้ที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่ามีการสั่นขณะเคลื่อนที่



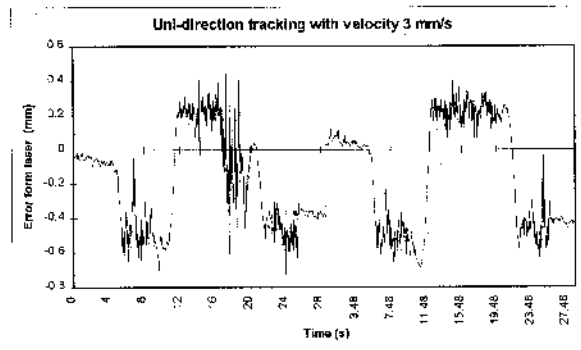
รูปที่ 5.43 ตำแหน่งของแกน y,z ของชั้นงานชั้นที่ 1 ในการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว



รูปที่ 5.44 ค่าจากเลเซอร์ของชั้นงานชั้นที่ 1 ในการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว



รูปที่ 5.45 ตำแหน่งของแกน y,z ของชั้นงานชั้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว



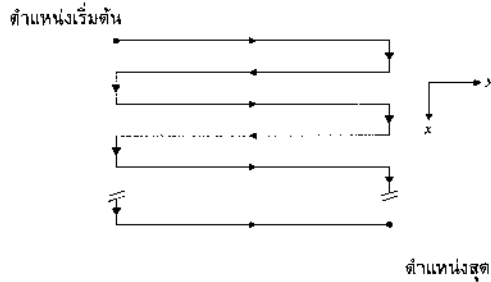
รูปที่ 5.46 ค่าจากเลเซอร์ของชั้นงานชั้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว

ตารางที่ 5.10 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งสำหรับทางเดินแบบทิศทางเดียวที่ความเร็วต่าง ๆ

ความเร็ว (mm/s)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ขึ้น (mm)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ลง (mm)
3	0.50	0.20
5	0.50	0.30
10	0.60	0.40

2.2 รูปแบบทางเดินแบบไปกลับ (Zig-zag) จะมีรูปแบบในการเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว คือมีการเคลื่อนที่ในแกนที่ขนานกับระนาบแกนใดแกนหนึ่งร่วมกับการเคลื่อนที่ในแนว

แกน z เพื่อเก็บข้อมูล แต่เมื่อถึงจุดสิ้นสุดในการเคลื่อนที่ 1 เส้นทางแล้ว จะไม่เคลื่อนไปตั้งต้นยังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่ แต่จะใช้ตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่เส้นทางต่อไป จึงทำให้การเคลื่อนที่มีลักษณะติดต่อกันไปมาดังรูปที่ 5.47

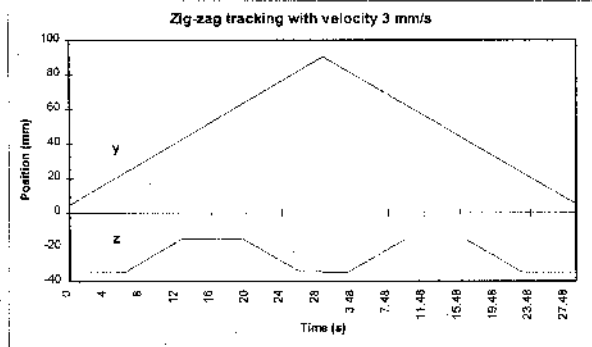


ตำแหน่งสุดท้าย

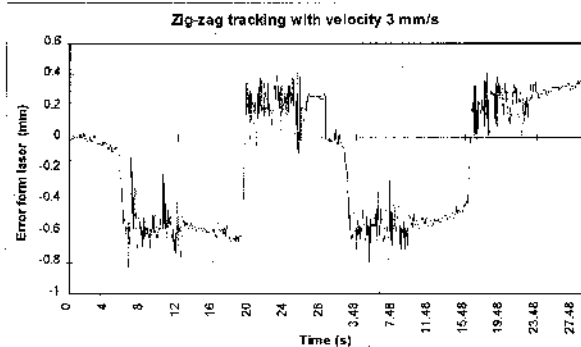
รูปที่ 5.47 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบไปกลับ

วิธีการเคลื่อนที่แบบนี้จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่ารูปแบบทิศทางเดียว เส้นทางแต่ละเส้นจะสลับกันไปมา ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.48 - 5.51

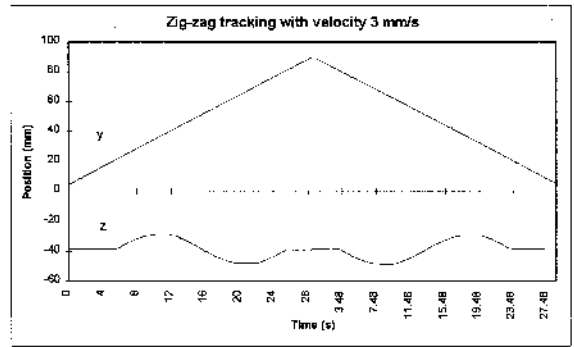
จากรูปที่ 5.48 และ 5.50 แสดงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่เวลาต่างๆ ของแกน y และ z ในขณะที่เคลื่อนที่เก็บข้อมูลตามแกน y แบบไป-กลับ จะเห็นว่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่ เวลาต่าง ๆ จะเหมือนกับการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว และค่าผิดพลาดที่ได้จากเลเซอร์ในรูปที่ 5.49 และ 5.51 แสดงให้เห็นว่าค่าที่วัดได้มีลักษณะใกล้เคียงกันกับการเคลื่อนที่แบบทิศทางเดียว โดยมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.4 ถึง -0.65 มิลลิเมตร ในการเก็บข้อมูลของพื้นผิวที่มีความชันเป็นบวก และมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.4 มิลลิเมตร สำหรับพื้นผิวที่มีความชันเป็นลบ เมื่อทดลองที่ความเร็วต่าง ๆ จะได้ค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่วัดได้จากเลเซอร์ดังตารางที่ 5.11 ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้น และที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่ามีการสั่นขณะเคลื่อนที่



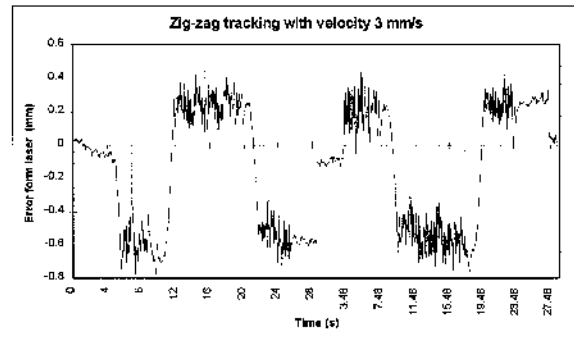
รูปที่ 5.48 ตำแหน่งของแกน y,z ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ในการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ



รูปที่ 5.49 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ในการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ



รูปที่ 5.50 ตำแหน่งของแกน y,z ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

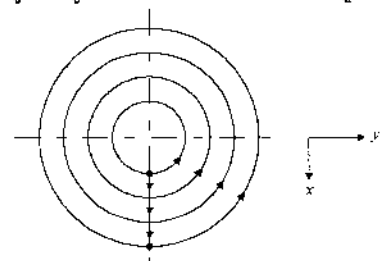


รูปที่ 5.51 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

ตารางที่ 5.11 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งสำหรับทางเดินแบบไป-กลับ ที่ความเร็วต่าง ๆ

ความเร็ว (mm/s)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ขึ้น (mm)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ลง (mm)
3	0.55	0.20
5	0.60	0.35
10	0.65	0.45

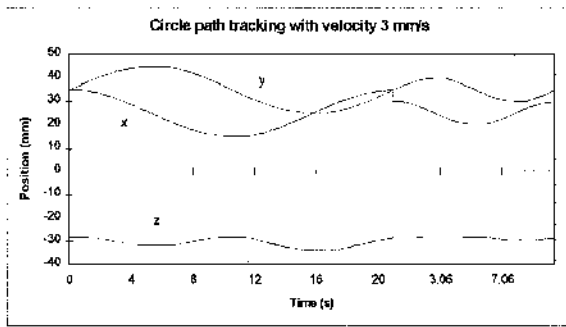
2.3 รูปแบบทางเดินแบบวงกลม รูปแบบนี้เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลม การเคลื่อนที่ของชุดเคลื่อนที่จะเคลื่อนไปพร้อมกันทั้ง 3 แกนขณะเก็บข้อมูล การเคลื่อนที่ในแต่ละวงจะเหมือนกับการทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลมในการทดสอบแบบพื้นฐาน เมื่อเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งในการเก็บข้อมูลโดยเปลี่ยนขนาดรัศมีของวงกลม แต่จะใช้จุดศูนย์กลางในแนวระนาบ x, y เดียวกัน ความเร็วในการเคลื่อนที่แต่ละวงจะเท่ากัน พื้นที่ในการเก็บข้อมูลจะมีรูปร่างแบบวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 5.52



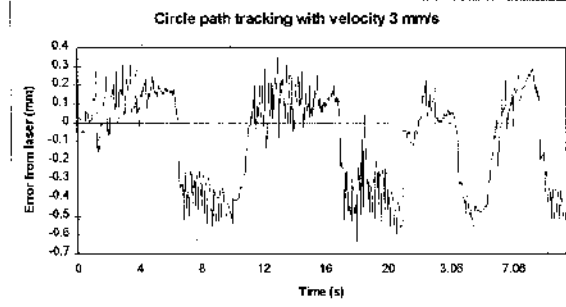
รูปที่ 5.52 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบวงกลม

จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแต่ละวง จะอยู่ที่ตำแหน่งสูงสุดของระยะทางแกน x และที่ตำแหน่งบนแกน y เท่ากับ 0 และสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของแต่ละวงที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นจึงเปลี่ยนไปยังตำแหน่งเริ่มต้นของวงกลมอื่นต่อไป ผลในการ

ทดลองเก็บข้อมูลโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่แบบวงกลมแสดงไว้ในรูปที่ 5.53 - 5.54



รูปที่ 5.53 ตำแหน่งของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบวงกลม จากรูปที่ 5.53 แสดงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่เวลาต่าง ๆ แบบวงกลมในแนวแกน x และ y ขนาดรัศมี 10 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร ที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน ตำแหน่งของทั้ง 2 แกน จะผิดพลาดใกล้เคียงกับการทดสอบแบบพื้นฐาน พิจารณารูปที่ 5.54 จะเห็นว่า ค่าผิดพลาดจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ผ่านมา ค่าผิดพลาดจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.3 มิลลิเมตร เมื่อความชันมีค่าเป็นลบ และอยู่ในช่วง -0.2 ถึง -0.6 มิลลิเมตรเมื่อความชันมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ที่ไม่มีผลต่อการควบคุมระยะห่างระหว่างหัววัดกับผิวชิ้นงานในแนวแกน z จากตารางที่ 5.12 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดของระยะห่างระหว่างหัววัดกับผิวของชิ้นงานที่ได้จากเลเซอร์ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 3 และ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จะเห็นว่าค่าผิดพลาดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้น ส่วนค่าเฉลี่ยที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาทีจะน้อยกว่าค่าเฉลี่ยที่ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากที่ความเร็วสูงจะเกิดการสั่นในบางช่วงจึงทำให้ค่าผิดพลาดมีการแกว่งไปมา



รูปที่ 5.54 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ในการเคลื่อนที่แบบวงกลม ตารางที่ 5.12 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งสำหรับทางเดินแบบวงกลมที่ความเร็วต่าง ๆ

ความเร็ว (mm/s)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ขึ้น (mm)	ค่าผิดพลาดเคลื่อนที่ลง (mm)
3	0.40	0.20
5	0.50	0.30
10	0.60	0.40

2.4 รูปแบบทางเดินจากโปรแกรม ACAD เป็นการนำเอารูปแบบการเคลื่อนที่ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม ACAD มาใช้เป็นทางเดินในการเก็บข้อมูล วิธีนี้จะสามารถสร้างรูปแบบได้ตามต้องการ ข้อดีของ

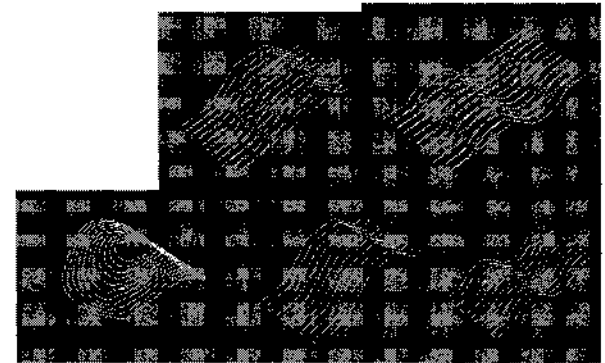
การใช้รูปแบบจากโปรแกรมนี้ คือสามารถกำหนดบริเวณที่จะทำการเก็บข้อมูลได้ดี ในกรณีที่ต้องการเก็บข้อมูลของชิ้นงานบางส่วนให้ละเอียดหรือมากกว่าส่วนอื่น และสามารถสร้างรูปแบบที่เหมาะสมกับชิ้นงานได้ดีกว่า ในกรณีที่รูปร่างของชิ้นงานมีลักษณะอื่นที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบทั่วไป

**ข้อจำกัดของอุปกรณ์**

จากการทดสอบการทำงานพบว่า เครื่องติดตามคอนทัวร์ยังมีข้อจำกัดในการทำงานอีกหลายอย่างดังนี้

1. ไม่สามารถวัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนมาก ๆ
2. ไม่สามารถวัดชิ้นงานที่มีความชันของพื้นผิวมาก ๆ
3. ไม่สามารถวัดชิ้นงานที่ไม่มีผิวต่อเนื่องของพื้นผิว
4. ไม่สามารถวัดชิ้นงานที่มีพื้นผิวเป็นลักษณะ มันทาว เช่น โลหะกระจก
5. ไม่สามารถวัดชิ้นงานที่มีสีดำ หรือสีที่ค่อนข้างทึบแสงมาก ๆ

ข้อจำกัดที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ เนื่องจากมีช่วงการวัดจำกัด เพียง  $\pm 3$  มิลลิเมตร และไม่สามารถใช้กับพื้นผิวของชิ้นงานบางชนิดได้ จากการทดสอบการวัดชิ้นงานที่มีพื้นผิวเอียง พบว่า ชุดเคลื่อนที่ในแนวแกน z ซึ่งควบคุมระยะห่างระหว่างหัววัดกับพื้นผิวชิ้นงานจะเกิดการสั่น เพราะความเข้มของแสงจากเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาจากผิวของชิ้นงานมีค่าไม่คงที่



รูปผล contours ที่ทำการทดสอบ

**6) สรุปผลการทดลอง**

จากการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะเคลื่อนที่ xyz ไปตามทางเดินที่กำหนดในรูปแบบต่าง ๆ และการทดลองเพื่อติดตามคอนทัวร์ของชิ้นงานทดสอบในรูปแบบทางเดินของแนวแกน x และ y ที่กำหนดและรักษาระยะห่างระหว่างอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์กับผิวของชิ้นงานเพื่อเก็บข้อมูลขนาดของชิ้นงาน ทำให้สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การทดสอบรูปแบบพื้นฐานของโต๊ะเคลื่อนที่ในแนวแกนและรูปแบบต่าง ๆ พบว่ามีค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วเกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งด้วยความเร็วที่กำหนด ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1.1 การเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่ จากรูปที่ 5.1 ถึง 5.12 เมื่อเคลื่อนที่ในแกน x และ y ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที และเคลื่อนที่ในแนวแกน z ด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแกน x และ y จะเกิดค่าผิดพลาดสูงและเกิดการแกว่งในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ จากนั้นจะเริ่มคงที่ที่ 0.55 มิลลิเมตร และ 0.4 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่าผิดพลาดของแนวแกน z จะอยู่ที่ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร โดยไม่เกิดการแกว่งในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่เหมือนแกน x และ y สำหรับความเร็วในการเคลื่อนที่ แกน x จะมีค่าผิดพลาด

อยู่ในช่วง  $\pm 2$  มิลลิเมตรต่อวินาที แกน  $y$  อยู่ในช่วง  $\pm 5$  มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนแกน  $z$  จะเกิดค่าผิดพลาดของความเร็วก่อนข้างมากในบางช่วง แต่ค่าส่วนมากจะอยู่ในช่วง  $\pm 5$  มิลลิเมตรต่อวินาที จากตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 เป็นผลจากการทดสอบโดยเพิ่มความเร็วจาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที จนถึง 12 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแกน  $x$ , 40 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแนวแกน  $y$  และ 15 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแนวแกน  $z$  โดยไม่เกิดการสั่น พบว่าค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของตำแหน่งและความเร็ว และค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งและความเร็ว มีค่าเพิ่มขึ้น

1.2 การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงแบบสไปรัล จากรูปที่ 5.13 - 5.24 จะพบว่า ค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่จะน้อยกว่าค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่ประมาณ 20-50% และตารางที่ 5.4 - 5.6 เป็นผลจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ พบว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วโดยเฉลี่ย ค่าผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งและความเร็วสูงสุดของความเร็วมักเพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าผิดพลาดต่างๆ ของการเคลื่อนที่แบบสไปรัลกับค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่เส้นตรงแบบความเร็วคงที่ ดังตารางที่ 5.1 - 5.3 กับตารางที่ 5.4 - 5.6 พบว่าค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่เส้นตรงแบบสไปรัลจะมีค่าน้อยกว่า การเริ่มต้นการเคลื่อนที่ที่ราบรื่นกว่า และเกิดการแกว่งน้อยกว่า

1.3 การเคลื่อนที่แบบหักมุมแกน  $x$ ,  $y$  จากการทดสอบพบว่าการสั่นและมีค่าผิดพลาดทั้งตำแหน่งและความเร็วในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากทางเดินเป็นแบบความเร็วคงที่ จนถึงตำแหน่งที่มีการหักมุมหรือการเคลื่อนที่กลับทิศทางทันทีในแต่ละแกน พบว่ามีค่าผิดพลาดสูงเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของชุดเฟืองทดในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ซึ่งไม่สามารถจำลองแบบการเคลื่อนที่ได้ ส่วนค่าผิดพลาดขณะเคลื่อนที่จะใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงความเร็วคงที่และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยความเร็วสูงขึ้น

1.4 การเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวแกน  $x$ ,  $y$  จากผลการทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าสูงในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากทางเดินที่สร้างเป็นแบบความเร็วคงที่ และในช่วงการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ค่าผิดพลาดจะอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.5 มิลลิเมตร ส่วนค่าผิดพลาดของความเร็วยังอยู่ในช่วง  $\pm 3$  มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ผลดังตารางที่ 5.8 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของตำแหน่งและความเร็วของทั้ง 2 แกน มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าผิดพลาดในขณะเคลื่อนที่กลับทิศทางที่เกิดขึ้น เกิดจากค่าแอมพลิจูดของชุดเฟืองทด

1.5 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $z$  แบบรูปคลื่นไซน์ จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งจะมีค่าประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ในขณะที่ ค่าผิดพลาดของความเร็วมักมีค่าประมาณ 30 ถึง 80% ซึ่งเกิดจาก แรงเสียดทานของระบบซึ่งมีค่าไม่เท่ากันตลอดระยะเคลื่อนที่ ส่วนหนึ่งของค่าผิดพลาดเกิดจาก มวลของชุดเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และการขัดตัวของแกนจากการประกอบที่ไม่ได้ศูนย์หรือมีระยะไปเล็กน้อย

2. การทดสอบการติดตามคอนทัวร์ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่สร้างขึ้นและเคลื่อนที่ตามรูปแบบที่กำหนด เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบ กับตำแหน่งที่ทำการเก็บข้อมูลได้ จึงใช้การวิเคราะห์ที่รูปร่างของชิ้นงานและค่าผิดพลาดในแนวแกน  $z$  จากอุปกรณ์วัดเลเซอร์ พบว่าการใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ มีผลทำให้

ค่าผิดพลาดน้อยลง เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความสูงของผิวชิ้นงานที่ความเร็วต่ำมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วในการเคลื่อนที่สูง จึงทำให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมระยะห่างได้ดีกว่า และที่ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงพบว่า อุปกรณ์มีการสั่นมากขึ้น จากการทดสอบการติดตามคอนทัวร์ ในรูปแบบทิศทางเดียว แบบไปกลับ และแบบวงกลม พบว่าสามารถควบคุมค่าผิดพลาดเฉลี่ยจากเลเซอร์ได้ไม่เกิน 0.6 มิลลิเมตร

#### เอกสารอ้างอิง

- 1) วงศ์สิทธิ์ มารัตน์. การควบคุม พี.ไอ.ดี.พี. ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- 2) Bollinger, John G., and Duffie, Neil A., *Computer control of machines and processes.*, Addison-Wesley, 1988.
- 3) Kuo, B.C., *Digital control systems.*, 2nd ed., Saunders College, 1992.
- 4) Nachtigal, Chester L., *Instrumentation and control fundamentals and applications.*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- 5) Ogata, Katsuhiko, *Modern control engineering.*, 2nd ed., Prentice-Hall International, Inc., 1990.
- 6) Palm, William John, *Control systems engineering.*, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- 7) Reid, J. Gary., *Linear system fundamentals.*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., 1985.
- 8) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก, รายงานฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยระดับเอกสมโภช, พฤษภาคม 2535
- 9) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, "การควบคุมระบบพลศาสตร์", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.