

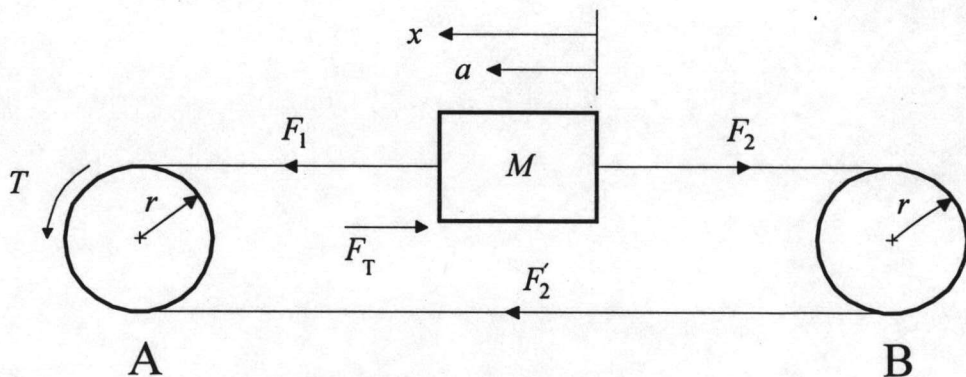
บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดเคลื่อนที่

การควบคุมระบบหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ จำเป็นที่จะต้องเข้าใจการทำงานและสถานะของระบบ เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบควบคุมที่เหมาะสม และ ผลตอบสนองของระบบที่ดี จึงต้องทำการทดสอบระบบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์และทดสอบจากการทำงานจริง ระบบที่จำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากเท่าใด ตัวควบคุมที่หาได้ก็จะมีเหมาะสมมากเท่านั้น ถ้าตัวควบคุมที่ได้ไม่ถูกต้อง อาจทำให้เกิดสถานะที่ไม่เสถียร (Unstable) ขึ้นได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหาย

การทำงานของชุดเคลื่อนที่ที่ใช้ มี 2 ลักษณะ คือ แกน x, y ใช้มอเตอร์และชุดเฟืองทดขับเคลื่อนที่มีลดสลิ้งเป็นตัวส่งกำลัง ส่วน แกน z มอเตอร์จะขับเคลื่อนโดยตรง เราสามารถพิจารณาระบบขับเคลื่อนแต่ละแกนโดยจำลองการทำงานได้ดังนี้

แบบจำลองของแกน x และ y

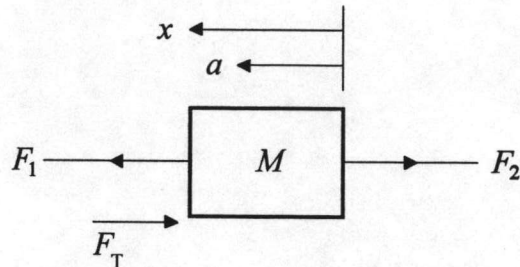


รูปที่ 3.1 แผนภาพอิสระ ของชุดเคลื่อนที่แกน X, Y

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพอิสระของระบบเคลื่อนที่แกน x และ y โดยใช้มอเตอร์ที่ล้อ A รัศมี r ขับดึงลวดสลึงซึ่งผูกติดอยู่กับมวล M มีแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานของตั้บลูกปืนที่รองรับ F_T เมื่อมอเตอร์หมุนขับในทิศทางนาฬิกา เกิดแรงดึง F_1 ตามแนวสลึง

ทำให้มวล M เคลื่อนที่ไปทางซ้ายด้วยความเร่ง a ที่ระยะ x ใด ๆ สวนกับแรงเสียดทาน F_T และแรงดึง F_2 จากล้อ B

พิจารณา แผนภาพอิสระของมวล M



รูปที่ 3.2 แผนภาพอิสระของมวล M

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน $\sum F = Ma;$

$$F_1 - F_2 - F_T = Ma$$

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

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

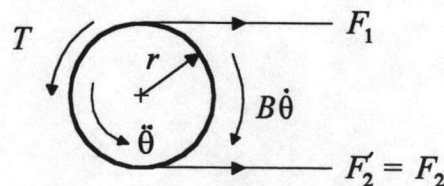
$$F_1 - F_2 = M(r\ddot{\theta} + \mu g) \quad (3.2)$$

μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตลับลูกปืน = 0.015

g = ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/sec^2

r = รัศมีของล้อ = 0.025 m

พิจารณาแผนภาพอิสระของล้อ A



รูปที่ 3.3 แผนภาพอิสระของล้อ A

ถ้าไม่คิดแรงเสียดทานที่แกนของล้อ B จะได้ว่า $F_2 = F_2'$ จากสมการ

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

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

โดยที่ T = แรงบิดจากมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

J = โมเมนต์แรงเฉื่อยของล้อและมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

B = สัมประสิทธิ์วิสกอสแดมปี้งของมอเตอร์ผ่านเฟืองทด

จากการเคลื่อนที่แบบเชิงมุมเป็นแบบเชิงเส้นจะได้ว่า $x = r\theta$

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

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

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

กำหนดให้

T_m = แรงบิดจากมอเตอร์ = $K_T \cdot i$

K_T = ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์

i = กระแสที่ป้อนให้มอเตอร์

M = มวลที่เคลื่อนที่

J_m = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์

B_m = สัมประสิทธิ์วิสกอสแดมปี้งของมอเตอร์

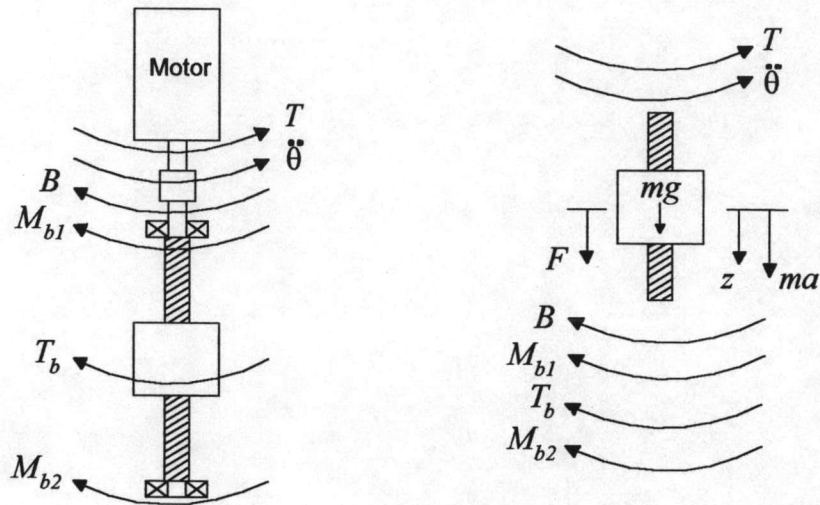
x = ระยะที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้น

r = รัศมีของล้อสายพาน

n = อัตราทดของเฟืองขับ

แบบจำลองของแกน z

1. ขณะเคลื่อนที่ขึ้น



รูปที่ 3.4 แผนภาพอิสระของชุดเคลื่อนที่แกน z ขณะเคลื่อนที่ขึ้น

จากรูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพอิสระของระบบเคลื่อนที่แกน z โดยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนบอลสกรู โดยตรงซึ่งทำให้มวล m เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตามทิศทางการหมุน มีแรงเสียดทานจากตัวบอลสกรู และตลับลูกปืนที่รองรับปลายทั้งสองด้านของสกรู

พิจารณาแผนภาพอิสระขณะเคลื่อนที่ขึ้นที่ระยะ z ใด ๆ

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

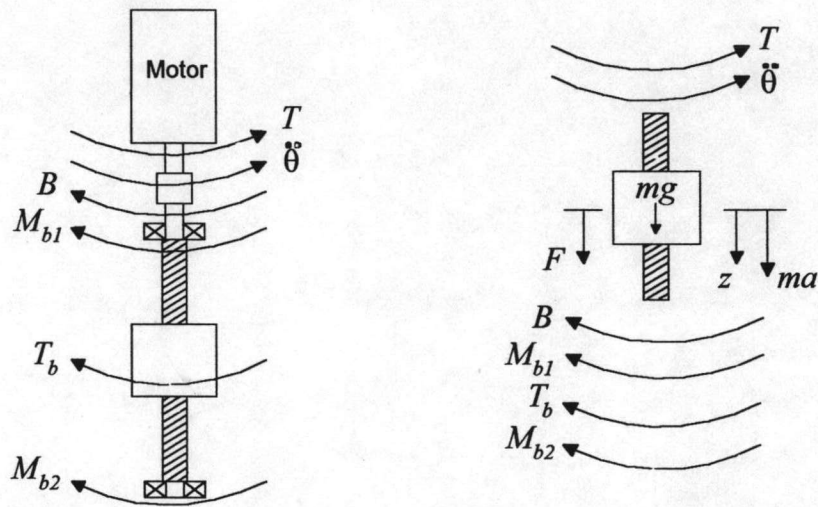
$$\left(J_{\text{motor}} + \frac{m_{\text{screw}} a^2}{2} + \frac{ml^2}{4\pi^2 \eta} \right) \frac{2\pi}{l} \ddot{z} + B \frac{2\pi}{l} \dot{z} = T - \frac{mgl}{2\pi\eta} - M_{b1} - M_{b2} \quad (3.5)$$

โดยที่

- T = แรงบิดของมอเตอร์
- J_{motor} = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์
- m = มวลภาระที่ต้องขับเคลื่อน
- m_{screw} = มวลภาระของบอลสกรู
- a = รัศมีของเพลาบอลสกรู

- B = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีงของมอเตอร์
 T_b = แรงเสียดทานจากบอลสกรู = $ml/2\pi\eta^1$
 F = ภาระที่กระทำกับแกน z
 M_{b1}, M_{b2} = แรงเสียดทานจากตลับลูกปืนที่ปลายสกรูทั้งสองข้าง
 l = ระยะเคลื่อนที่ของบอลสกรูต่อการหมุน 1 รอบ (lead)
 η = ประสิทธิภาพการทำงานของบอลสกรู

2. ขณะเคลื่อนที่ลง



รูปที่ 3.5 แผนภาพอิสระของชุดเคลื่อนที่แกน z ขณะเคลื่อนที่ลง

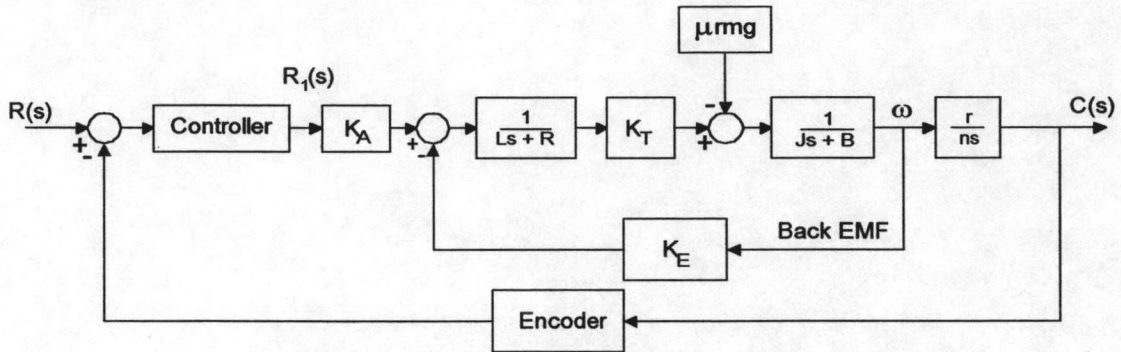
สมการของชุดเคลื่อนที่แนวแกน z ขณะเคลื่อนที่ลง

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

¹ "Star the linear motion product range", Deutsche star GmbH, May 1990

แบบจำลองแบบแผนภูมิ

การควบคุมในแนวแกน x และ y เป็นลักษณะการขยายแรงดัน (Voltage amplifier) ซึ่งอธิบายไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.6 แผนภูมิต่อระบบควบคุมแนวแกน x และ y

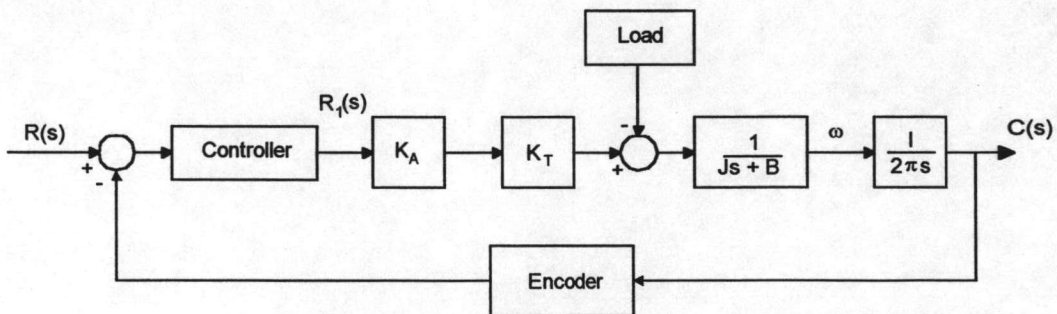
จากรูปที่ 3.6 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ถูกควบคุมได้ดังนี้

$$\frac{C_x(s)}{R_{1x}(s)} = \frac{K_{Ax} K_{Tx} r/n}{s[(L_x s + R_x)(J_x s + B_x) + K_{Tx} K_{Ex}]} \quad (3.7)$$

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

$$\frac{C_x(s)}{R_{1x}(s)} = \frac{K_{Ax} K_{Tx} r/n}{s(R_x J_x s + R_x B_x + K_{Tx} K_{Ex})} \quad (3.8)$$

สำหรับการควบคุมในแกน z จะเป็นลักษณะการขยายกระแส (Current amplifier) ซึ่งอธิบายไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.7 แผนภูมิต่อระบบควบคุมแนวแกน z

และจากรูปที่ 3.7 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระบบของชุดเคลื่อนที่แกน z ได้ดังนี้

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

เมื่อเปรียบเทียบสมการข้างต้นกับสมการที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นว่า ภาระ (Load) ที่กระทำในรูปที่ 3.7 คือ แรงเสียดทานจากบอลสกรูและจากแบร์ริง จัดให้อยู่ในรูปทั่วไป

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

ค่าตัวแปรของแกนต่าง ๆ จะเป็นดังนี้

แกน x

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

แกน y

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

แกน z

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

K_{Ax}, K_{Ay}, K_{Az}	=	อัตราขยายของแอมป์ลิไฟเออร์ 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
	=	$J_{motor} + \frac{mr^2}{n^2}$, สำหรับแกน x, y
	=	$J_{motor} + \frac{m_{screw} a^2}{2} + \frac{m_z l^2}{4\pi^2}$, สำหรับแกน z
L_x, L_y	=	ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (Inductance) แกน x, y

$$\begin{aligned}
 B_x, B_y, B_z &= \text{ค่าคงที่แดมปีง (Damping Constant) แกน } x, y, z \\
 R_x, R_y &= \text{ค่าความต้านทานของขดลวดมอเตอร์ แกน } x, y
 \end{aligned}$$

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

จากสมการในรูปทั่วไป 3.10 ให้อยู่ในรูป z ได้ดังนี้

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

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

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

เมื่อแทนค่าของระบบทั้งหมด จะได้สมการของชุดเคลื่อนที่ในแนวแกนต่าง ๆ ที่เวลาการสุ่ม $T = 0.02$ วินาที

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

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

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

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



แกน z

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

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

การหาสมการตัวควบคุม

เมื่อได้สมการของระบบที่ถูกควบคุมในรูป z แล้ว เราสามารถหาสมการของตัวควบคุมจากระบบที่ถูกควบคุมที่ไม่มีการกระเพื่อมระหว่างการสุ่ม (without intersampling ripple) ได้ดังนี้
จัดรูปแบบสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดดูได้ดังนี้

$$M(z) = (1 + cz^{-1})M_1z^{-1} \quad (3.20)$$

$$1 - M(z) = (1 - z^{-1})(1 + a_1z^{-1}) \quad (3.21)$$

โดยที่ $c = (1 - Tae^{-aT} - e^{-aT}) / (Ta - 1 + e^{-aT})$ 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 2.21 สมการตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองแบบเดดบิท คือ

$$D(z) = \frac{1}{G_p(z)} \cdot \frac{M(z)}{1 - M(z)} \quad (2.21)$$

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

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

$$\begin{aligned} m(0) &= \text{แรงดันด้านออกจากตัวควบคุมที่เวลาปัจจุบัน} \\ m(1) &= \text{แรงดันด้านออกจากตัวควบคุมที่เวลาก่อนหน้า 1 คาบการสุ่ม} \\ &= m(0) \text{ ที่เวลาการสุ่มครั้งที่แล้ว} \\ e(0) &= \text{สัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมที่เวลาปัจจุบัน} \\ e(1) &= \text{สัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมที่เวลาก่อนหน้า 1 คาบการสุ่ม} \\ &= e(0) \text{ ที่เวลาการสุ่มครั้งที่แล้ว} \end{aligned}$$

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

ในกรณีที่สัญญาณด้านเข้าเป็น แรมป์ (Ramp) ตัวควบคุมจะเหมือนกับตัวควบคุมที่ได้จากสัญญาณป้อนเข้าแบบ สเตป (Step) เนื่องจาก สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดลูป $M(z)$ กับ $1 - M(z)$ จะเหมือนกัน เมื่อให้สัญญาณป้อนเข้า $R(z)$ แบบสเตป ($z / (z - 1)$) จะได้ค่าสัญญาณออกที่ส่งให้กับระบบ ที่เวลาการสุ่มต่าง ๆ ดังนี้

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

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 จะได้สัญญาณที่เวลาการสุ่มต่าง ๆ ดังนี้

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

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

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

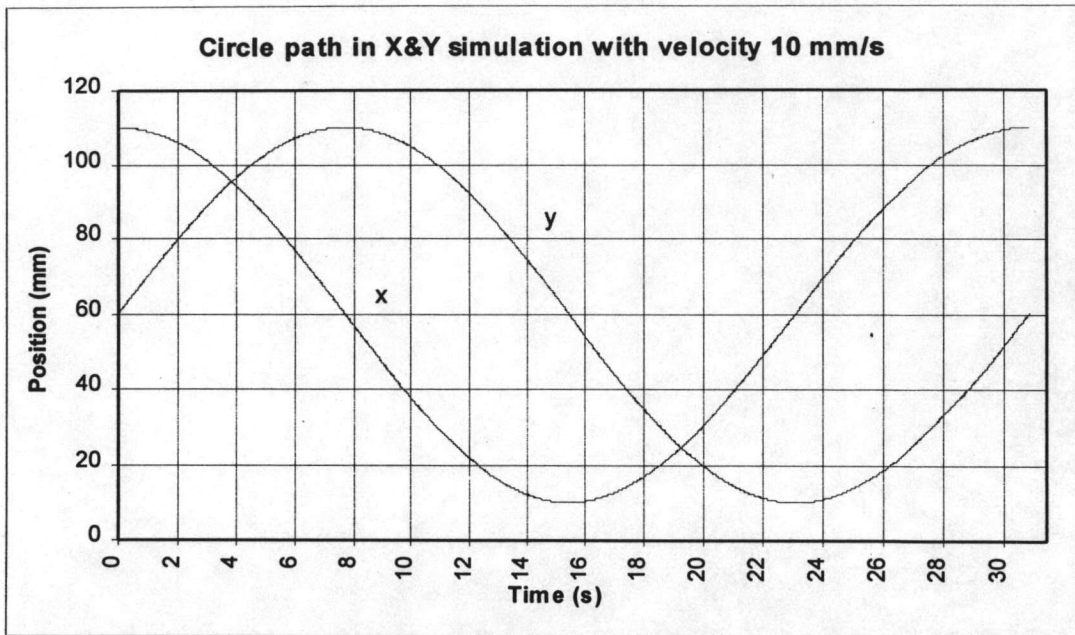
จะเห็นว่า ระบบจะเข้าสู่ค่าผิดพลาดเป็นศูนย์หรือเท่ากับสัญญาณที่ป้อนเข้าที่เวลาการสุ่มครั้งที่สอง สำหรับสัญญาณป้อนเข้าแบบ สเตป โดยดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์หน้า z แต่ละตัว ค่ายกกำลังคือครั้งที่เวลาการสุ่มใด ๆ

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยทางเดินที่สร้างขึ้น

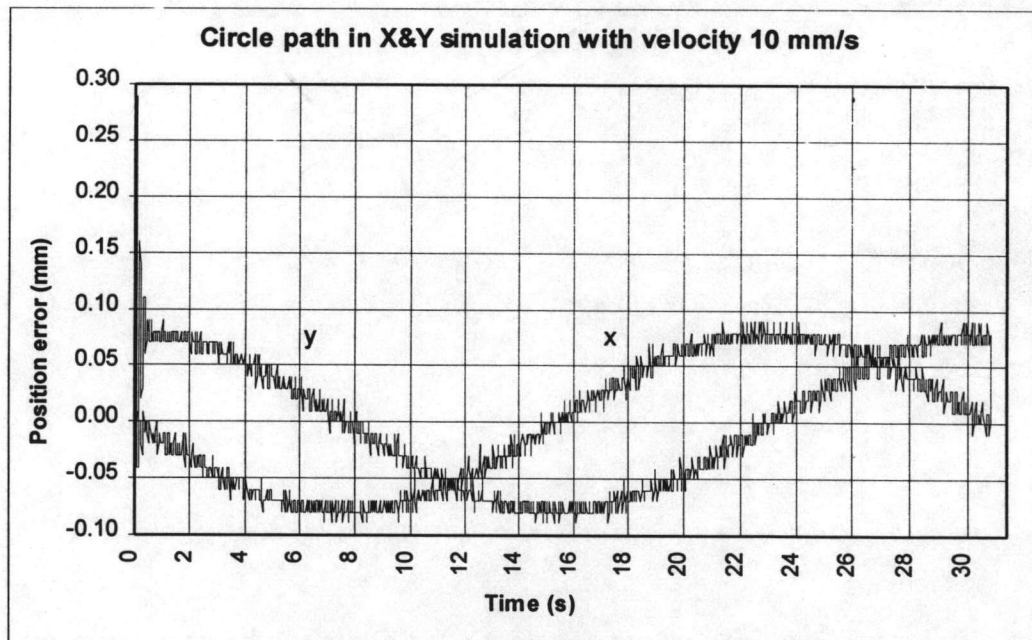
1. ทดสอบแบบจำลองแกน x และ y

ทดสอบด้วยการเคลื่อนที่แบบวงกลมซึ่งมีการเคลื่อนที่กลับทิศทางไปมาทั้ง 2 แกน โดยการสร้างทางเดินวงกลมแบบความเร็วคงที่ ซึ่งสร้างจากเส้นตรงที่มีขนาดเล็กมาต่อกันเป็นรูปวงกลม ทดสอบโดยการให้ชุดเคลื่อนที่เคลื่อนไปตามเส้นทางแบบวงกลมที่สร้างไว้ แล้วบันทึกผลของตำแหน่งที่เคลื่อนที่เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 - 3.13 ซึ่งเคลื่อนที่แบบวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วตามเส้นทาง 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

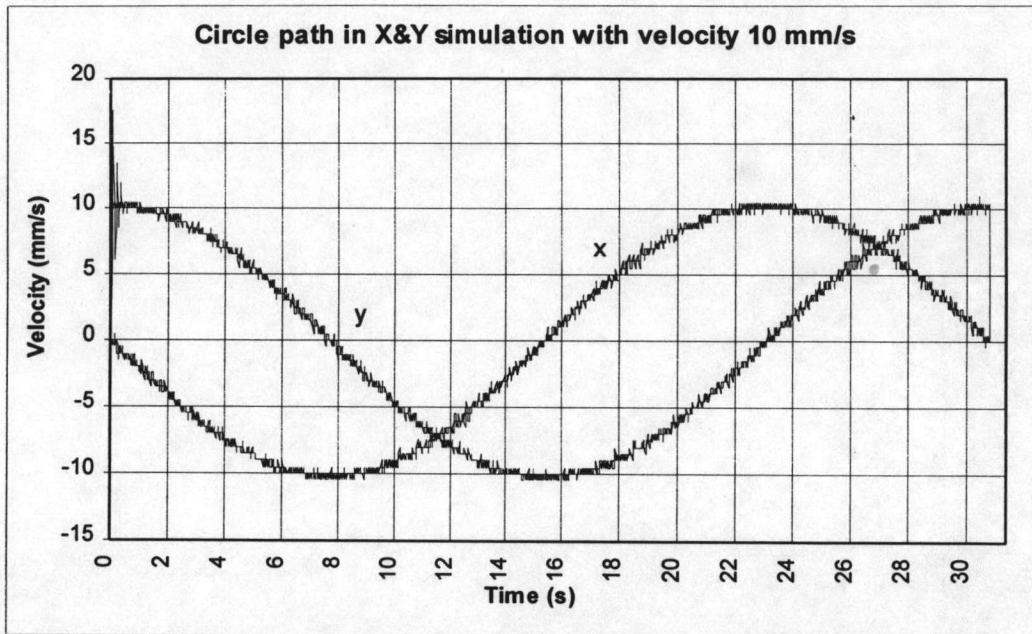
รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งที่เคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแนวแกน x และ y เทียบกับเวลา จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดมีค่าสูงสุดบริเวณช่วงแรกของการเคลื่อนที่อยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตรในแนวแกน y และมีค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของทั้ง 2 แกนอยู่ในช่วงประมาณ ± 0.08 มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.10 - 3.13 ซึ่งแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่ พบว่าค่าผิดพลาดของความเร็วในแนวแกน y จะมากกว่าในแกน x โดยค่าผิดพลาดความเร็วของแกน x อยู่ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และ y อยู่ในช่วง ± 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนค่าผิดพลาดสูงสุดของความเร็วมีค่า 8 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแนวแกน y



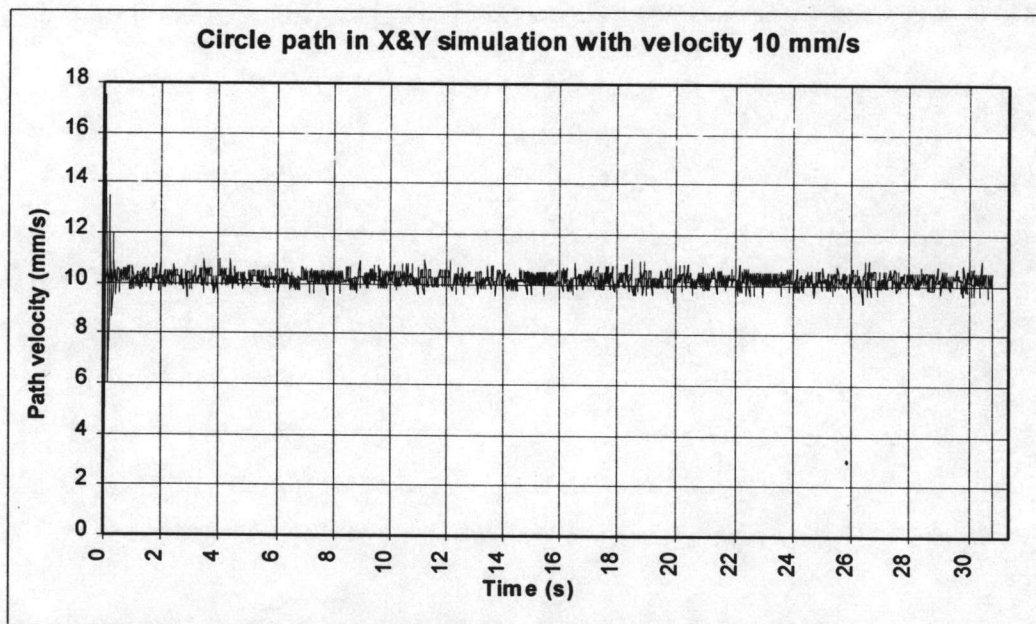
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



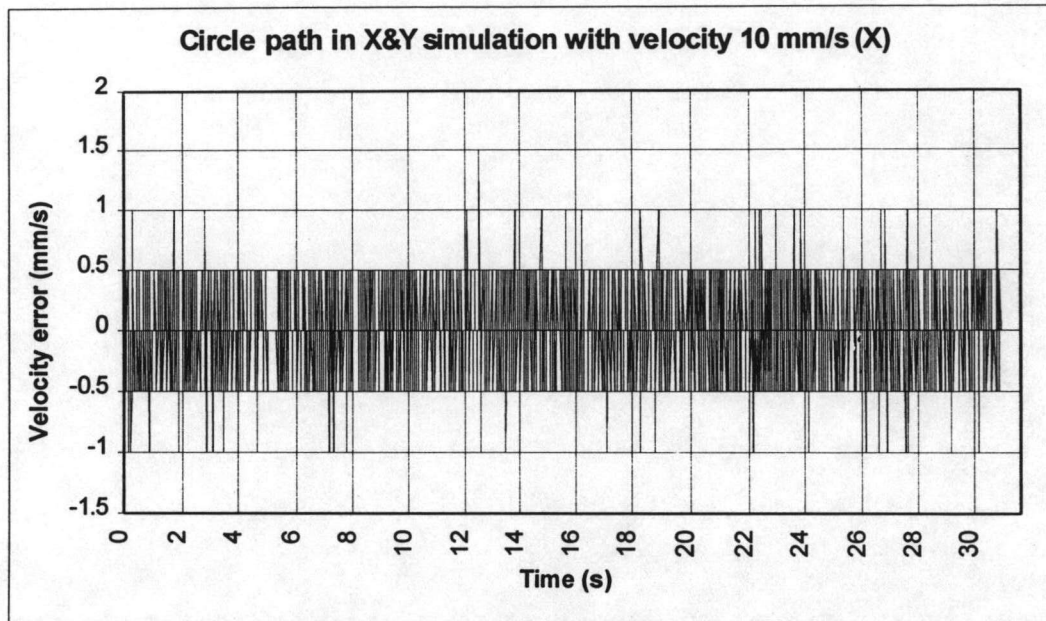
รูปที่ 3.9 ค่าผิดพลาดของตำแหน่งตามทางเดินแบบวงกลม
ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



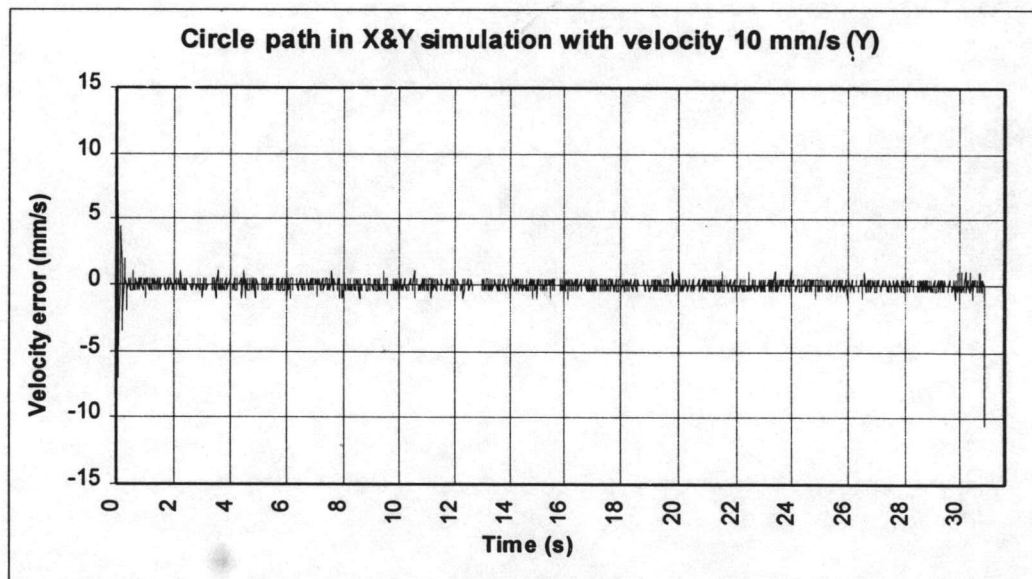
รูปที่ 3.10 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน x และ y



รูปที่ 3.11 ความเร็วตามทางเดินแบบวงกลมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



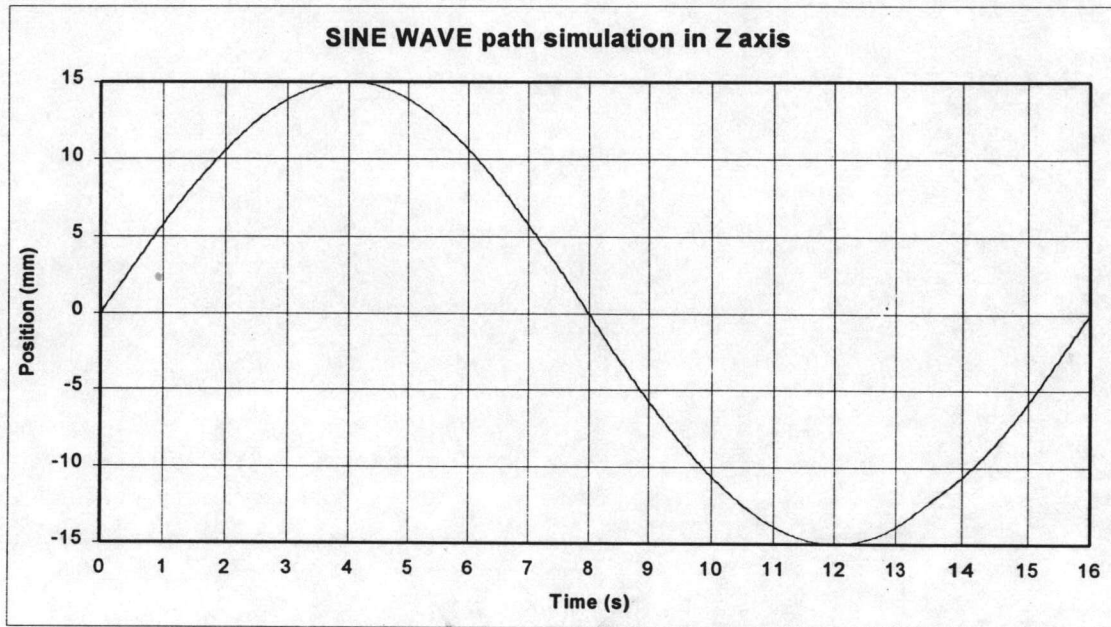
รูปที่ 3.12 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลม
ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แกน x



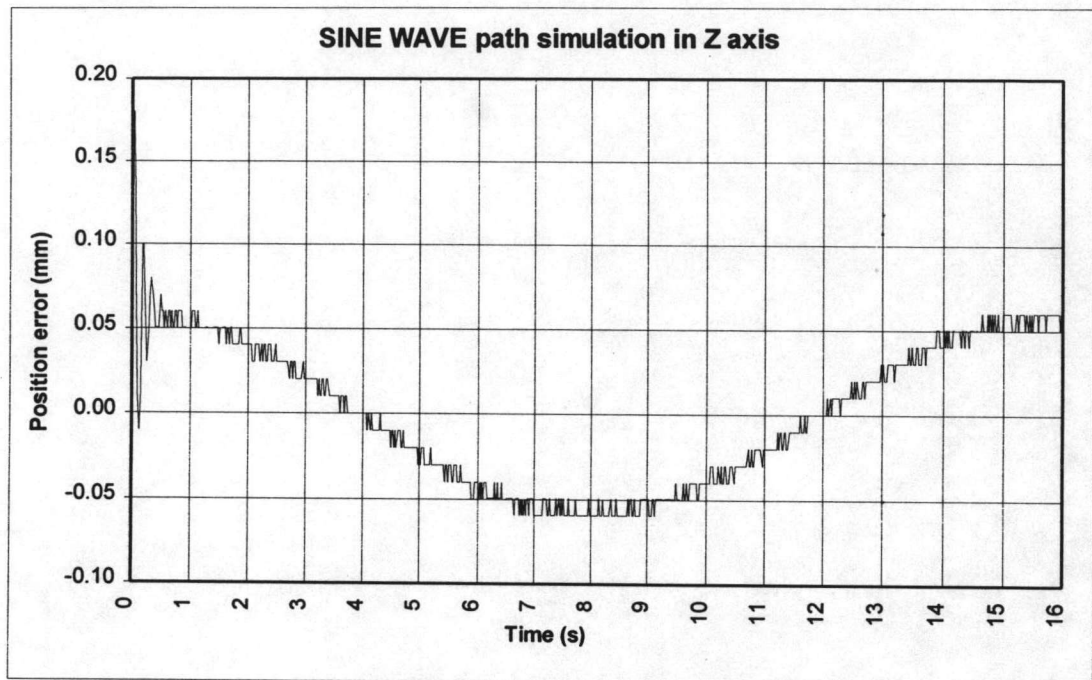
รูปที่ 3.13 ค่าผิดพลาดของความเร็วตามทางเดินแบบวงกลม
ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แกน y

2. ทดสอบแบบจำลองแกน z

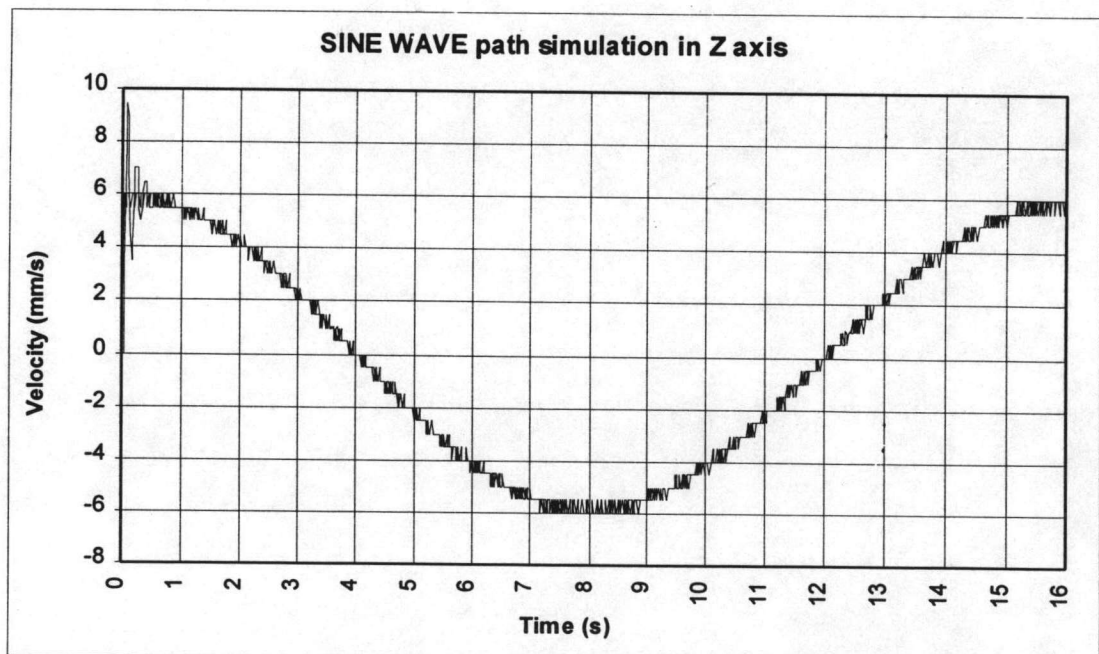
ทำการทดสอบด้วยการเคลื่อนที่รูปคลื่นไซน์ (sine wave) 1 ลูกคลื่น ด้วยขนาดความสูง 15 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างตำแหน่งโดยเฉลี่ยประมาณ 0.075 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 - 3.17



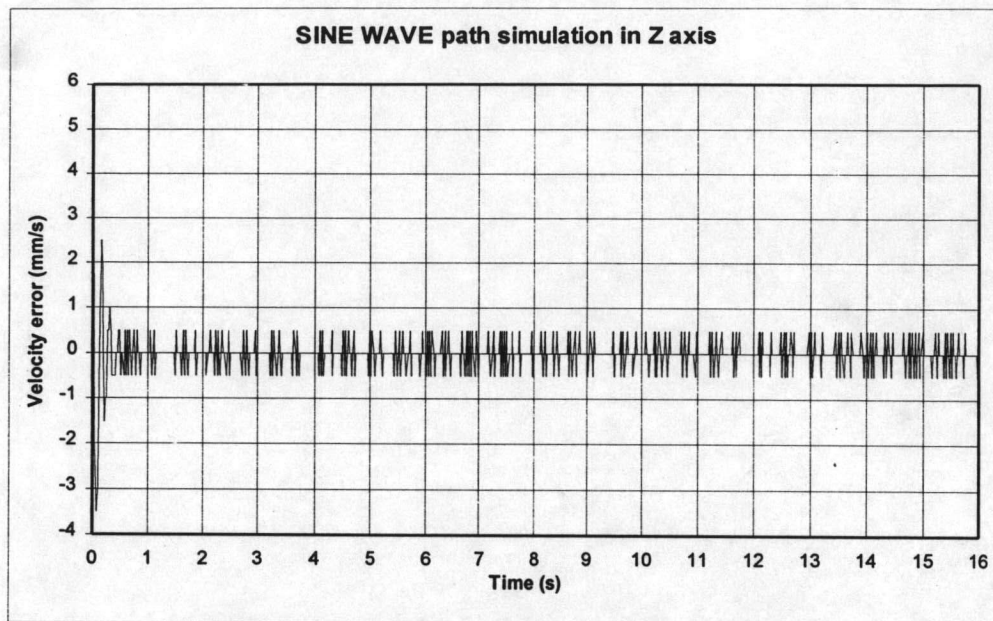
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งตามทางเดินแบบ sine ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แกน z



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 ± 0.05 มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งแสดงความเร็วและค่าผิดพลาดของความเร็ว จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะเกิดการแกว่งในช่วงแรกสูงถึง 6 มิลลิเมตรต่อวินาที และลดลงอยู่ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ตลอดระยะทาง

จากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโต๊ะเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อย และค่าผิดพลาดสูงสุดจะอยู่ที่เฉพาะช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จากนั้นค่าผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็ว