

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

วงศ์สิทธิ์ มาร์ตน์. การควบคุม พี.ไอ.ดี.พี. ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2530.

ภาษาอังกฤษ

Bollinger, John G., and Duffie, Neil A., **Computer control of machines and processes.**,
Addison-Wesley, 1988.

Kuo, B.C., **Digital control systems.**, 2nd ed., Saunders College, 1992.

Nachtigal, Chester L., **Instrumentation and control fundamentals and applications.**,
John Wiley & Sons, Inc., 1990.

Ogata, Katsuhiko, **Modern control engineering.**, 2nd ed., Prentice-Hall International, Inc.,
1990.

Palm, William John, **Control systems engineering.**, John Wiley & Sons, Inc., 1986.

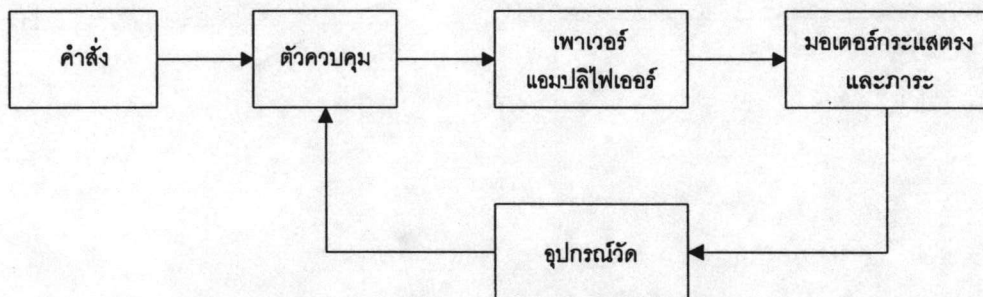
Reid, J. Gary., **Linear system fundamentals.**, 2nd ed., McGraw-Hill Book-Co., 1985.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ระบบการควบคุมมอเตอร์และส่วนประกอบ

ในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนิยมใช้ มอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฮดรอลิกหรืออุปกรณ์นิวเมติก เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน เนื่องจากความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก ได้มีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มาใช้ในระบบควบคุมกันอย่างแพร่หลาย มอเตอร์กระแสตรงนับว่าเป็นตัวขับเคลื่อนแบบหนึ่งที่ยังนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมขนาดเบา โดยใช้เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback control) หรือ ระบบควบคุมแบบปิดลูป (Closed-loop control) ส่วนประกอบพื้นฐานโดยทั่วไปของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แผนภูมิของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

ส่วนประกอบต่าง ๆ มีหน้าที่ในการทำงานดังนี้

คำสั่ง

เป็นส่วนที่ป้อนคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมระบบให้ทำงานตามต้องการ เช่น ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปเป็นชุดของคำสั่งเพื่อให้ทำงานต่อเนื่องกัน

ตัวควบคุม

เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงกับภาระ ทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างคำสั่งที่ป้อนเข้ากับสัญญาณจากอุปกรณ์วัด และปรับสัญญาณที่ส่งไปควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานตามคำสั่ง

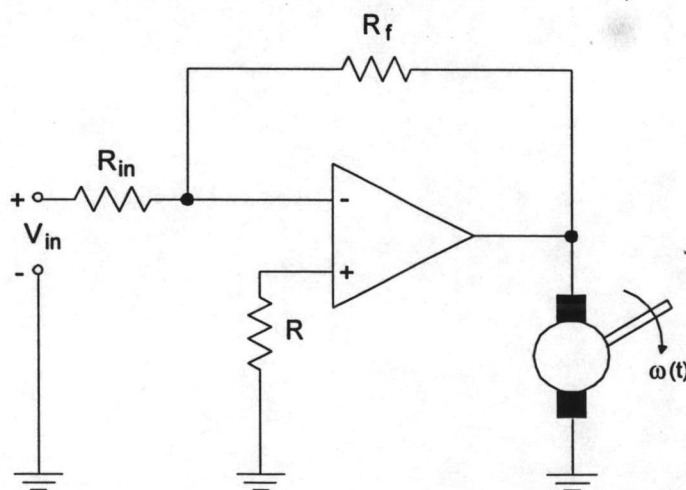
ตัวควบคุมแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ตัวควบคุมแบบอนาลอก (Analog controller) ลักษณะสัญญาณที่ควบคุมจะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) และ ตัวควบคุมแบบ ดิจิตอล (Digital controller) ลักษณะสัญญาณที่ควบคุมจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) การรับส่งข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมจำเป็นต้องมีการสุ่ม (Sampling) สำหรับโครงการวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบดิจิตอล และใช้ภาษา C เป็นชุดคำสั่งในการทำงาน

เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์

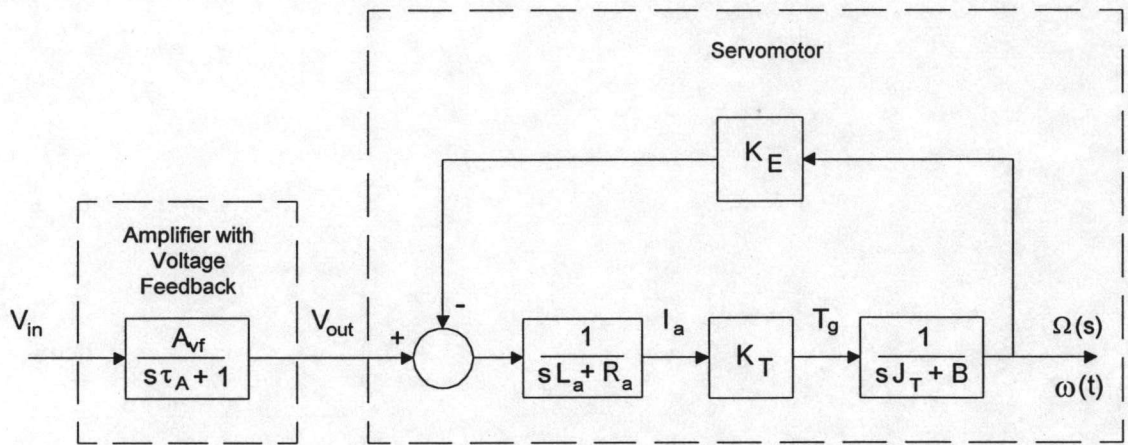
เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ มีหน้าที่ ขยายสัญญาณจากตัวควบคุมให้เหมาะสม ก่อนที่จะป้อนให้กับมอเตอร์ เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ใช้เป็นแบบ ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ ซึ่งเหมาะกับมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้พลังงานต่ำ และมีราคาถูก แต่มีการสูญเสียพลังงาน (Power losses) สูง เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ใช้ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้มี 2 แบบ คือ

1. แบบขยายแรงดัน

แอมพลิไฟเออร์แบบขยายแรงดันจะมีส่วนให้กำลังที่ทำงานโดยฟลิแอมพลิไฟเออร์ (ปกติจะแทนได้ด้วยออปแอมป์) คุณสมบัติของอุปกรณ์คือ ค่ามีความต้านทานด้านเอาต์พุตต่ำ (Low output impedance) ซึ่งเป็นการขยายแรงดันไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมองส่วนประกอบเหล่านี้เป็นกระบวนการแบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled velocity)



รูปที่ ก.2 แสดงวงจรแบบแรงดันป้อนกลับขับเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ ก.3 แสดงแผนภูมิของระบบควบคุมมอเตอร์แบบแรงดันป้อนกลับ

จากรูปที่ ก.2 วงจรแทนแอมพลิไฟเออร์แบบขยายแรงดันที่ประกอบด้วย ออปแอมป์ เป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการควบคุมแรงดัน รูปที่ ก.3 เป็นแผนภูมิที่ใช้แทนวงจร ในรูปที่ ก.2 ด้านซ้ายจะแทนวงจรขยายแรงดัน และด้านขวาแทนเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งมี แรงดันย้อนกลับ (back EMF) ที่ขึ้นอยู่กับความเร็รรอบของมอเตอร์

แอมพลิไฟเออร์แบบขยายแรงดันจะมีย่านการทำงานที่จำกัด เราสามารถแทนผลตอบสนองความถี่ (frequency response) ของแอมพลิไฟเออร์แบบนี้ได้ด้วยระบบแบบมีค่าโพลตัวเดียว (single-pole model) ในการใช้งานทางด้านหุ่นยนต์ทั่วไป ดังนั้นจึงกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการ

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A_{vf}}{1 + s\tau_A} \tag{ก.1}$$

$1/\tau_A$ คือ ความถี่ช่วงการทำงานของแอมพลิไฟเออร์

A_{vf} คือ ขนาดของค่าเกนซึ่งได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$|A_{vf}| = \frac{R_f}{R_{in}} \tag{ก.2}$$

รูปที่ ก.3 แสดงแผนภูมิของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง ที่ขับด้วยแอมพลิไฟเออร์ ฟังก์ชันถ่ายโอนโดยรวมจะหาได้จากการลดรูปและการคูณ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของแกนเพลามอเตอร์กับแรงดันป้อนเข้า คือ



$$\frac{\Omega(s)}{V_m(s)} = \frac{K_T/L_a J_T}{s^2 + [(R_a J_T + L_a B)/L_a J_T]s + (K_T K_E + R_a B)/L_a J_T} \cdot \frac{A_v}{(1 + s\tau_A)} \quad (ก.3)$$

จะเห็นว่า แรงดันป้อนกลับไม่มีผลกับตำแหน่งของค่าโพลของมอเตอร์ วิทยานิพนธ์นี้ใช้เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ในแกน x และ y แบบขยายแรงดันสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าจาก -36 ถึง 36 โวลท์ และจ่ายกระแสได้ 5 แอมป์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาท์พุตเป็นดังนี้

$$V_{out1} = 3.9827V_{in1} + 0.03115 \quad (ก.4)$$

$$V_{out2} = 3.9762V_{in2} + 0.04298 \quad (ก.5)$$

โดยที่

$$V_{out1} = \text{แรงดันเอาท์พุตของช่องที่ 1}$$

$$V_{in1} = \text{แรงดันอินพุตของช่องที่ 1}$$

$$V_{out2} = \text{แรงดันเอาท์พุตของช่องที่ 2}$$

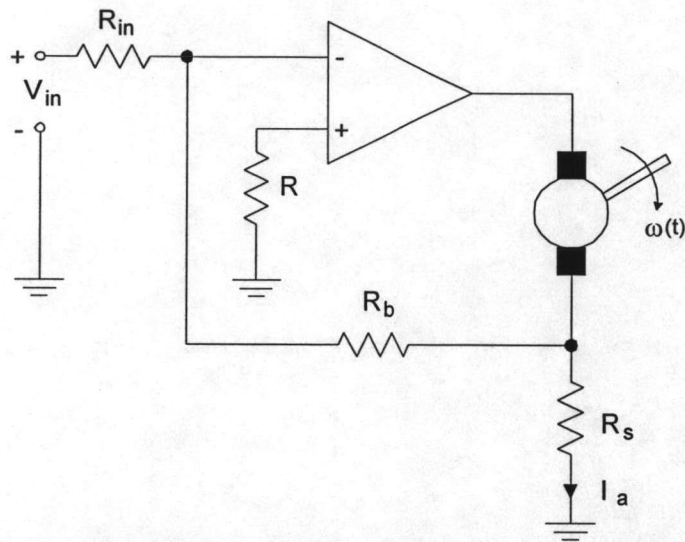
$$V_{in2} = \text{แรงดันอินพุตของช่องที่ 2}$$

2. แบบขยายกระแส

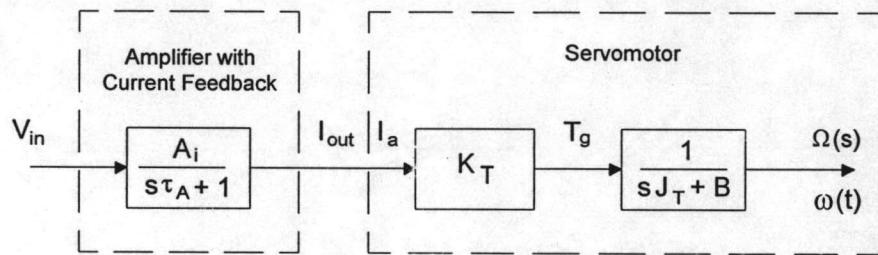
อีกวิธีหนึ่งในการขับเซอร์โวมอเตอร์ คือใช้ แอมพลิไฟเออร์แบบขยายกระแส (high-impedance) ดังแสดงในรูปที่ ก.4 เป็นการทำงานแบบกระแสที่ย้อนกลับมาทำให้กระแสด้านออกมีค่าคงที่สำหรับค่าแรงดันป้อนเข้าใดๆ พิจารณาสมการทางพลศาสตร์ของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงแสดงให้เห็นว่าตัวที่เกี่ยวข้องกับความเป็นไปทางไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทาน และความเหนี่ยวนำของขดลวดคอปเมเจอร์ ร่วมกับค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (back EMF) ไม่มีผลต่อกระแสที่ใช้ขับมอเตอร์ จากสมการของมอเตอร์ในรูป s ไม่คิดค่าแรงบิดคงที่ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์กับกระแสดังนี้

$$K_T I_a(s) = (sJ_T + B)\Omega(s) \quad (ก.6)$$

จัดรูปแบบของสมการ ก.6 เป็นความสัมพันธ์ของกระแสไหลในขดลวดคอปเมเจอร์กับความเร็วของเพลามอเตอร์ได้ดังสมการที่ ก.7 จะเห็นว่าอุปกรณ์สร้างความเร็วแบบควบคุมกระแส (current-controlled velocity)



รูปที่ ก.4 วงจรแอมพลิไฟเออร์ขับเซอร์โวมอเตอร์แบบกระแสป้อนกลับ



รูปที่ ก.5 แผนภูมิของระบบควบคุมมอเตอร์แบบกระแสป้อนกลับ

$$\frac{\Omega(s)}{I_a(s)} = \frac{K_T}{sJ_T + B} \tag{ก.7}$$

ผลจากแรงบิดจะมีค่าขึ้นอยู่กับ กระแสที่ไหลในขดลวดอเมเจอร์ เพราะฉะนั้น แอมพลิไฟเออร์แบบขยายกระแสจึงเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมแรงบิดด้วย (torque control) ในความเป็นจริงแอมพลิไฟเออร์แบบขยายกระแสมีช่วงการทำงานที่จำกัดสามารถจำลองด้วยสมการดังนี้

$$\frac{I_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A_i}{1 + s\tau_A} \tag{ก.8}$$

$1/\tau_A$ คือ ความถี่ช่วงการทำงานของแอมพลิไฟเออร์

A_i คือ ค่าเกนของแอมพลิไฟเออร์หน่วยเป็นแอมป์ต่อโวลต์ เป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานด้านเข้าความต้านทานป้อนกลับและความต้านทานตรวจวัด (sense resistor)

$$|A_i| = \frac{R_b}{R_{in} R_s} \quad (ก.9)$$

พิจารณาให้ R_s มีค่าน้อยกว่า R_b ฟังก์ชันถ่ายโอนโดยรวมของมอเตอร์ซึ่งขับโดยแอมพลิไฟเออร์แบบขยายกระแสได้จาก คุณสมบัติการ ก.7 กับ ก.8 จะได้

$$\frac{\Omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_T A_i}{(sJ_T + B)(1 + s\tau_A)} \quad (ก.10)$$

รูปที่ ก.5 เป็นแผนภูมิที่ไ้แสดงระบบ เมื่อเปรียบเทียบสมการ ก.3 กับสมการ ก.10 จะเห็นว่าค่าโพลของมอเตอร์จะเปลี่ยนไปจากการใช้กระแสป้อนกลับ โดยความเป็นจริงแล้ว เราจะมองมอเตอร์เป็นแบบค่าโพลเดียว มากกว่าจะเป็นแบบค่าโพล 2 ค่า ค่าทางกลศาสตร์ของระบบที่มีผลกับความเป็นไปของระบบเซอร์โว เช่น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยโดยรวม (J_T) และ ค่าวิสคอสแดมปีง (B)

เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ที่ไ้ใช้ในแกน z เป็นแบบขยายกระแส (Current Amplifier) ทำจากบริษัท Electro Craft รุ่น LA-5600 เป็นชนิด ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ เหมาะสำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรขนาดเล็ก และขนาดกลางทั่วไป สามารถจ่ายกระแสได้ถึง 22 แอมป์ เมื่อไ้เป็นอุปกรณ์ขยายกระแส ในกรณีที่ไ้ใช้งานแบบต่อเนื่องสามารถไ้ได้ในช่วง 0 - 9 แอมป์ เพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจากการไ้ใช้งาน สำหรับอัตราขยายของอุปกรณ์จะมีค่าประมาณ 5 แอมป์/โวลต์ ส่วนค่าคงที่เวลา (Time Constant) ของอุปกรณ์ มีค่าสูงถึง 2 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) หรือ 0.0005 วินาที ซึ่งไม่มีผลกับระบบ

มอเตอร์กระแสตรงและภาวะ

เป็นอุปกรณ์ที่ไ้ใช้ในการขับเคลื่อน วิทยานิพนธ์นี้ไ้ใช้ มอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (DC servomotor) มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์โมเจอร์อินดักแตนซ์และแรงเฉื่อยต่ำ โดยในตัวมอเตอร์จะมีทาโคมิเตอร์ (Tachometer) ติดอยู่ มอเตอร์ที่ไ้ใช้ทั้ง 3 แกน ทำจาก บริษัท Electro Craft ในแนวแกน X และ Y มอเตอร์ที่ไ้ใช้คือรุ่น E586-MGHP 586-022-113 จะมีชุดเฟืองทด

อัตราส่วน 1: 100 สำหรับแกน Z ใช้รุ่น E588 0588-33-500 รายละเอียดและขนาดของมอเตอร์แสดงไว้ในภาคผนวก ค

อุปกรณ์วัดและป้อนกลับ

เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณออกของระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น ระยะทาง ความเร็ว และป้อนกลับไปยังตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับคำสั่งที่ต้องการ แล้วส่งผลต่างไปยังตัวควบคุมต่อไป อุปกรณ์วัดมีความสำคัญในระบบควบคุมแบบปิดลูป อุปกรณ์วัดที่ใช้มี 2 แบบ คือ

1. อุปกรณ์ที่ให้สัญญาณแบบอนาลอก

1.1 ทาโคมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบของการหมุน สัญญาณที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแปรผันตามความเร็ว

$$V = 14.2 V_{vel}$$

V = ค่าแรงดันที่ได้จากทาโคมิเตอร์ (Volt)

V_{vel} = ความเร็วรอบของมอเตอร์ (krpm)

1.2 อุปกรณ์วัดแบบแสงเลเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณแบบอนาลอก แบบที่ใช้เป็นอุปกรณ์วัดระยะที่มีความละเอียดสูงถึง 0.5 ไมโครเมตร มีจุดอ้างอิงอยู่ที่ 40 มม. และช่วงการวัด ± 3 มม. รายละเอียดของอุปกรณ์นี้แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

2. อุปกรณ์ที่ให้สัญญาณแบบดิจิทัล

2.1 ออปติคอลลินีเยร์เอนโคดเดอร์ (Optical linear encoder) เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งซึ่งให้สัญญาณแบบดิจิทัล มีความละเอียดสูงถึง 0.01 มิลลิเมตร เอนโคดเดอร์ของแกน x และ y มีช่วงการวัด 1050 มม. ส่วนแกน z มีช่วงการวัด 650 มม. การบอกตำแหน่งของอุปกรณ์วัดแบบเอนโคดเดอร์จะใช้การตรวจจับแสงเคลื่อนที่ผ่านช่องที่มีความทึบแสงและโปร่งแสงสลับกัน แล้วให้สัญญาณแบบ TTL รูปเหลี่ยม 2 ช่องซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งนำมาเป็นรหัสบอกตำแหน่งได้โดยผ่านอุปกรณ์ถอดรหัส เรียกว่า ดีโคดเดอร์ (Decoder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากเอนโคดเดอร์ แล้วส่งตำแหน่งที่ได้จากการนับเป็นสัญญาณแบบ ดิจิตอลขนาด 17 บิต เพื่อส่งผ่านแผ่นวงจร TTL ให้กับคอมพิวเตอร์

โต๊ะชุดเคลื่อนที่

แนวแกน x และ y จะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ ตั้งฉากกันใช้ตลับลูกปืนเป็นล้อในการเคลื่อนที่ โครงสร้างในการเคลื่อนที่ทำจากอลูมิเนียม ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อนส่ง

กำลังผ่านชุดเฟืองทดและระบบล้อสายพานโดยใช้สลิง วัดระยะทางโดยใช้เอนโคเดอร์ติดอยู่ที่แกน ซึ่งเคลื่อนที่ได้ 950 มิลลิเมตร

แนวแกน z เคลื่อนที่ขึ้นลงตั้งฉากกับแนวระนาบและแกน x,y ใช้บอลสกรูเป็นตัวส่งกำลังจากมอเตอร์กระแสตรง ไปยังแกนซึ่งติดอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ไว้ที่ปลายด้านล่าง มีตัววัดตำแหน่งแบบเอนโคเดอร์ขนาด 650 มิลลิเมตร ติดอยู่กับชุดขับเคลื่อนเพื่อวัดระยะที่เคลื่อนที่ไป ชุดเคลื่อนที่ชุดนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะสูงสุดประมาณ 400 มิลลิเมตร

แผ่นวงจรติดต่อระหว่าง คอมพิวเตอร์ กับอุปกรณ์ภายนอก (Interface cards)

ในการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องรับส่งสัญญาณระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก อุปกรณ์รับส่งมีอยู่หลายชนิดหลายแบบ ตามแต่การใช้งานและความเหมาะสม แผ่นวงจรเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก แผ่นวงจรที่ใช้ได้แก่

1. แผ่นวงจรของบริษัท Data translation รุ่น DT 2801-A ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1.1 ส่งข้อมูลสัญญาณอนาล็อก (D/A) 2 ช่องสัญญาณ อยู่ในช่วง ± 10 V. ความละเอียด 12 บิต

1.2 รับข้อมูลสัญญาณอนาล็อก (A/D) 16 ช่องสัญญาณ อยู่ในช่วง ± 10 V. ความละเอียด 12 บิต

1.3 ช่องรับส่งสัญญาณแบบดิจิตอลขนาด 16 บิต

2. แผ่นวงจรของบริษัท PC Lab รุ่น PCL- 812

1.1 ส่งข้อมูลสัญญาณอนาล็อก (D/A) 2 ช่องสัญญาณ ในช่วง 0-5 V. ความละเอียด 12 บิต

1.2 รับข้อมูลสัญญาณอนาล็อก (A/D) 16 ช่องสัญญาณ ในช่วง ± 10 V. ความละเอียด 12 บิต

1.3 ช่องรับส่งสัญญาณแบบดิจิตอลขนาด 16 บิต TTL

3. แผ่นวงจร TTL มีช่วงรับส่งสัญญาณดิจิตอลขนาด 8 บิต จำนวน 8 ช่องสัญญาณ ใช้ในการรับสัญญาณไบนารีของตำแหน่งจากเอนโคเดอร์

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์

อุปกรณ์แบบเลเซอร์ที่ใช้ เป็นของบริษัท KEYENCE รุ่น LC - 2011 เป็นอุปกรณ์เลเซอร์ ชนิด เซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor) แบบพัลส์กำลังต่ำ ตัวอุปกรณ์จะสร้างลำแสงเลเซอร์ที่มองไม่เห็น ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร กำลังของลำแสงมีค่าน้อยกว่า 3 มิลลิวัตต์ ลำแสงไม่มีอันตรายใด ๆ ต่อผิวหนัง แต่เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อดวงตา ข้อควรระวังในการใช้งานมีดังนี้

1. อย่ามองลำแสงเลเซอร์โดยตรง หรือลำแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุที่สามารถสะท้อนแสงได้มาก ๆ
2. ใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้ใช้เฉพาะกับอุปกรณ์ชนิดนี้เท่านั้น
3. อย่าปรับปรุ้งหรือซ่อมแซมอุปกรณ์เอง

อุปกรณ์จะเริ่มสร้างลำแสงเมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที หลังจากอุปกรณ์เริ่มทำงาน ระยะโฟกัสของอุปกรณ์อยู่ที่ 40 มิลลิเมตร จากเลนส์ที่ปล่อยแสง ช่วงในการวัดมีค่า ± 3 มิลลิเมตร จากระยะโฟกัส

คุณสมบัติในการทำงานของอุปกรณ์วัดเลเซอร์

1. แสดงระยะห่างหรือปริมาณของแสงด้วยจอภาพแบบตัวเลข ซึ่งเป็นระยะห่างของชิ้นงานจากตำแหน่งโฟกัส ระยะจะมีค่าเป็น 0 เมื่อผิวชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัสพอดี มีค่าเป็นบวกเมื่อชิ้นงานอยู่ห่างจากหัววัดเลยตำแหน่งโฟกัสออกไป และมีค่าเป็นลบเมื่อชิ้นงานเข้าใกล้หัววัด ระยะห่างที่แสดงจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายออกมา ($1\text{mV}=1\mu\text{m}$)
2. สามารถปรับค่าอัตราขยายได้โดยอัตโนมัติ เมื่อปริมาณแสงที่วัดได้ มีมากหรือน้อยเกินไป
3. สามารถเลือกอัตราความเร็วในการวัดค่าได้ 3 ระดับ คือ 0.001 , 0.01 และ 0.1 วินาที ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงควรเลือกที่ 0.1 วินาที
4. สามารถปรับค่า ฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ได้ 2 ระดับ (50 และ 10 ไมโครเมตร) ถ้าต้องการวัดค่าที่มีขนาดเล็กควรปรับไว้ที่ตำแหน่ง NARROW (10 ไมโครเมตร)

5. แสดงสัญญาณ ใกล้ (NEAR) เมื่อระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัววัดมีขนาดน้อยกว่าระยะโฟกัส และ ไกล (FAR) เมื่อเมื่อระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัววัดมีขนาดมากกว่าระยะโฟกัส

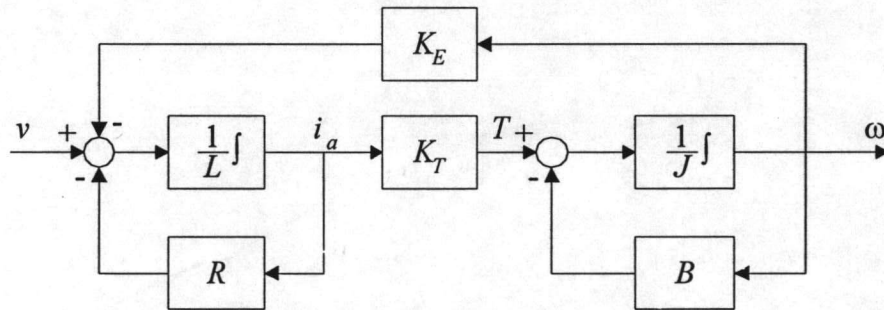
ตารางที่ ๓.1 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์เลเซอร์

รุ่น Model	หัววัด	LC-2011
	อุปกรณ์ควบคุม	LC-2001
Light source		Semiconductor laser (780 nm, 3mW max. pulse duration: 50 micro second)
Reference distance		40 mm
Measurement range		± 3 mm
Spot diameter		0.05 mm max.
Analog output	Output voltage	± 3 V (1mV/1 μ m)
	Output impedance	Approx. 33 Ω
	Resolution	0.5 μ m
	Linearity	$\pm 0.3\%$ of measured range
	Responsivity	DC to 600 Hz (at 1 ms) -3dB/DC to 60 Hz (at 10 ms) -3dB/DC to 6 Hz (at 100 ms) -3dB
	Temperature fluctuation	Sensor: 1.0 μ m/ $^{\circ}$ C Controller: 0.5 μ m/ $^{\circ}$ C
Control output	Solid-state	Open-collector 100 mA (40 V) max.
	Contact	SPST-NO relay contact x 2 250VAC 2A(resistive load)
Response delay time	Solid-state	1 ms/10ms/100ms
	Contact	21ms/30ms/120ms

ภาคผนวก ค

มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในระบบควบคุมทั่วไป ตั้งแต่ระบบควบคุมแบบธรรมดาที่ไม่ต้องการความแม่นยำไปจนถึงระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง มอเตอร์กระแสตรงมีหลายแบบ หลายขนาด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน อุปกรณ์อื่นที่ติดตั้งมากับมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ช่วยในการควบคุม เช่น อุปกรณ์วัดความเร็ว อุปกรณ์วัดตำแหน่ง แบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปเขียนได้ดังรูป ค.1 ซึ่งแทนมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ ค.1 แผนภูมิของมอเตอร์กระแสตรง

ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้ใช้มอเตอร์กระแสตรง 3 ตัวในการขับเคลื่อน จากบริษัท Electro Craft โดยแต่ละตัวจะขับเคลื่อนในแต่ละแกน แกน x และ y ใช้มอเตอร์กระแสตรงรุ่น E586-022-113 และ แกน z ใช้รุ่น E588 0588-33-500 ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะดังนี้

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ขับเคลื่อนแนวแกน x, y

Model E586-022-113			
Rated Voltage	V_r	V	36
NO_LOAD SPEED at V_r	N_o	rpm	6200
MAX.RATED I at STALL	I_r	A	4.6
STALL TORQUE at I_r	T_o	oz-in	29
MAX.PULSE CURRENT	I_{pk}	A	24
TORQUE CONSTANT	K_t	oz-in/A	7.8
VOLTAGE CONSTANT	K_e	volts/krpm	5.8
TERMINAL RESISTANCE	R_t	Ω at 25°C	1.1
Armature Mom.Inertia	J_m	oz-in-s ²	5.5×10^{-2}
Rotational Loss Constant	K_d	oz-in/krpm	0.1
Static Friction Torque	T_f	oz-in	3
Thermal Resistance Arm./Amb.	R_{th}	°C/W	5
ARMATURE INDUCTANCE	L_a	mH	2.3
ELECTRICAL Time Constant	τ_e	ms	2.1
MECHANICAL Time Constant	τ_m	ms	14
TACH. Voltage Gradient	K_g	V/krpm	14.2
TACH. Terminal Resistance	R_g	Ω at 25°C	720
TACH. Armature Inductance	L_g	mH	138
TACH. Load Resistance (optimum) R_l		Ω	5000
Ripple Amplitude		%pk-pk	5
LINEARITY		%	0.2
Temperature Coefficient		%/°C	-0.05

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ขับเคลื่อนแนวแกน z

MOTOR PARAMETERS (@ 155 °C Armature Temp.)	MODEL 0588-33-500
Continuous Stall Torque (oz-in)	50
Peak Torque (before demagnetization) (oz-in)	350
Armature Moment of Inertia (oz-in-s ²)	0.0078
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.30
Thermal Resistance (°C/watt)	4.2
Maximum Terminal Voltage (V)	60
Maximum Operating Speed (rpm)	6000
Weight (lbs)	3 lb. 12 oz.
WINDING DATA	3
K _T Torque Constant ± 10% (oz-in/amp)	11.8
K _E Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	8.7
Winding Resistance ± 15% @ 25 °C (Ω)	1.0
Electrical Time Constant (msec)	2.3
Mechanical Time Constant (msec)	11.3
Armature Inductance (mH)	3.3
Maximum Pulse Current (A)	31
TACHOMETER RATINGS	
Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	14.2
Resistance ± 15% @ 25 °C (Ω)	720
Ripple (peak to peak rated at 500 rpm) (%)	5

ภาคผนวก ง

ค่าคงที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของชุดเคลื่อนที่ในหน่วยเมตริก

แกน x, y

โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

$$J_{motor} = 3.885177 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีง

$$B = 6.745584 \times 10^{-6} \text{ N.m/(rad/s)}$$

ความต้านทานขดลวด

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

ความเหนี่ยวนำขดลวด

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

ค่าคงที่แรงบิด

$$K_T = 0.0550983 \text{ N.m/A}$$

ค่าคงที่แรงดัน

$$K_E = 0.05538592 \text{ V/(rad/s)}$$

รัศมีล้อขับ

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

อัตราทดเฟือง

$$n = 100$$

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเนื่องจากภาวะ

$$J_m = mr^2/n^2$$

$$J_{mx} = (11 + 9.249)(0.025)^2/100^2 \text{ kg.m}^2$$

$$= 4.01173325 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

$$\begin{aligned}
 J_{my} &= (11)(0.025)^2/100^2 \text{ kg.m}^2 \\
 &= 3.953927 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

แกน z

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู

$$r_{screw} = 0.016 \text{ m}$$

มวลของสกรู

$$\begin{aligned}
 m_{screw} &= (m_p l)(l_{screw}) \\
 &= (1.25)(0.56) \text{ (kg./m)(m)} \\
 &= 0.7 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

ระยะเกลียวต่อการหมุน 1 รอบ

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

มวลของนัท

$$m_{nut} = 0.25 \text{ kg.}$$

โมเมนต์ความเฉื่อยเนื่องจากสกรู

$$\begin{aligned}
 J_{screw} &= (m_{screw})(r_{screw})^2/2 \\
 &= (0.7)(0.008)^2/2 \text{ kg.m}^2 \\
 &= 2.24 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

โมเมนต์ความเฉื่อยเนื่องจากนัทและภาวะแกน z

$$\begin{aligned}
 J_{nut} &= (m_{nut} + m_p)lead^2/4\pi^2\eta \\
 &= (0.25 + 1)(0.005)^2/(4\pi^2 \cdot 0.9) \text{ kg.m}^2 \\
 &= 8.795242 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

โมเมนต์ความเฉื่อยมอเตอร์

$$J_{motor} = 5.5098875 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวม

$$\begin{aligned}
 J_z &= J_{motor} + J_{nut} + J_{screw} \\
 &= 5.5098875 \times 10^{-5} + 8.795242 \times 10^{-7} + 2.24 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \\
 &= 7.83783992 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์

$$K_T = 0.0833547 \text{ N.m/A}$$

สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมปีง

$$B = 2.02367499 \times 10^{-5} \text{ N.m/(rad/s)}$$

ค่าคงที่ในการแปลงค่า

$$1 \text{ oz.} = 0.0283495 \text{ kg.}, \quad 1 \text{ in.} = 0.0254 \text{ m.}$$

ภาษาทางคอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงไว้ในแฟ้มข้อมูลชื่อ SYSVAR.C

```
double PI = 3.141592654;
double Jmx = 3.885177e-4, /* kg.m^2 = 5.5e-2 oz-in-sec^2 */
      Bx = 6.745584e-6, /* N.m/(rad/s) = 0.1 oz-in/krpm */
      Rx = 1.1, /* ohm */
      Lx = 2.3e-3, /* H */
      Ktachx = 0.13560001, /* V/(rad/s) = 14.2 V/krpm */
      KTx = 0.0550989, /* N.m/A = 7.8 oz-in/A motor const. */
      KEx = 5.538592e-2, /* V/(rad/s) = 5.8 V/krpm back emf */
      Jx = 4.01173325e-5, /* kg.m^2 mx = 11 + 9.249 kg */
      Jy = 3.953927e-5, /* kg.m^2 my = 11 kg, use Jm=5.5e-3 */
      r = 0.025, /* radius of pulley, m. */
      ngear = 100, /* gear ratio */
      KAx = 4, /* amplifier gain ,V/V */

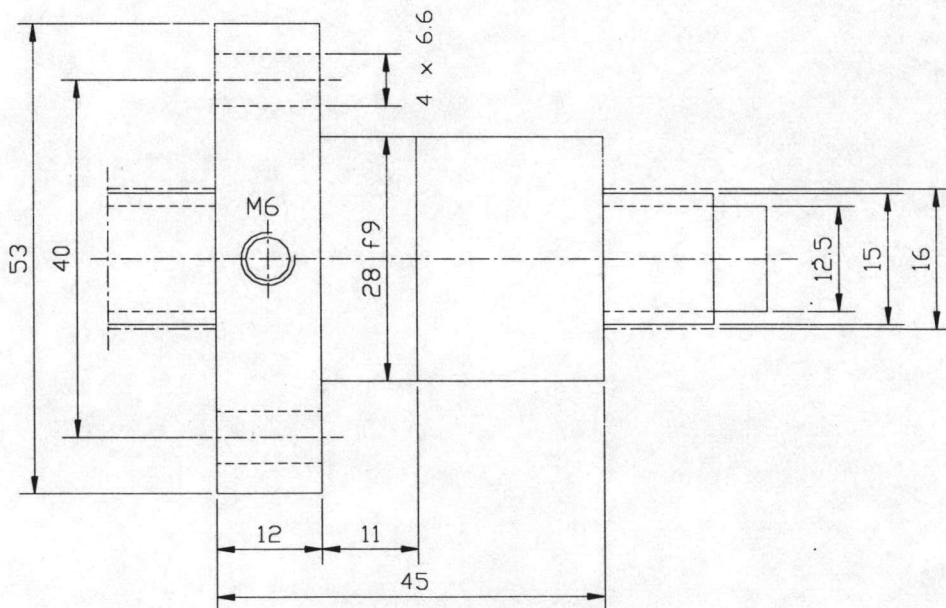
/* z axis */
Jscrew = 2.24e-5, /* kg.m^2 ,m*r^2/2=(0.7)(0.008)^2/2 */
Jnut = 8.7952416e-7, /* kg.m^2 ,m*I^2/(4*PI^2)
=(1+.25)(.005)^2/(4*PI^2)/0.9 */
lead = 0.005, /* lead ,m */
Jmz = 5.5098875e-5, /* kg.m^2 = .0078 oz-in-sec^2 */
```

Bz = 2.02367499e-5, /* N.m/(rad/s) = 0.3 oz-in/krpm */
Rz = 1, /* ohm */
Lz = 3.3e-3, /* H */
KTz = 0.0833547, /* N.m/A = 11.8 oz-in/A */
KEz = 8.307888e-2, /* V/(rad/s) = 8.7 V/krpm back emf */
Ktachz = 0.13560001, /* V/(rad/s) = 14.2 V/krpm */
Jz = 7.83783992e-5, /* kg.m^2 = Jmz + Jscrew + Jnut */
KAz = 5 /* Amplifier gain, A/V */ ; □

ภาคผนวก จ

บอลสกรู

บอลสกรู เป็น อุปกรณ์ที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่จากการหมุนเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ลักษณะของบอลสกรูจะมี 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ตัวสกรู จะเป็นแกนโลหะยาวรูปทรงกระบอก มีเกลียวโดยรอบ ลักษณะของเกลียวจะเป็นร่องโค้งแบบครึ่งวงกลมเพื่อให้ลูกบอลเหล็กวิ่งไปตามร่องได้ ส่วนที่สองคือ นัท ภายนอกเป็นโลหะ ภายในบรรจุลูกเหล็กขนาดเล็กหลายลูกเรียงตัวกันอยู่ เมื่อมีการหมุนของตัวสกรู ลูกบอลที่อยู่ในตัวนัทจะลัดไปตามร่องเกลียวของสกรู โดยจะเรียงตามเกลียว วนอยู่ในตัวนัท ทำให้มีความเสียดทานน้อยและมีความเที่ยงตรงสูง บอลสกรูบางชนิด มีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เพียง 5 ไมโครเมตรต่อระยะเคลื่อนที่ 300 มิลลิเมตร สำหรับโครงการวิทยานิพนธ์นี้ใช้บอลสกรูชนิดเกลียวเฉียงไรน มีความผิดพลาด 25 ไมโครเมตรต่อระยะทางเคลื่อนที่ 300 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ระยะเคลื่อนที่ ต่อการหมุน 1 รอบ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร



รูปที่ จ.1 ขนาดของบอลสกรู

ข้อมูลจำเพาะ

น้ำหนักสกรู	1.26	กิโลกรัมต่อเมตร
น้ำหนักนัท	0.25	กิโลกรัม
ภาระที่รับได้ ทางพลศาสตร์	11900	นิวตัน
ทางสถิตศาสตร์	16400	นิวตัน
ระยะคลอนตามแนวแกนสูงสุด	0.07	มิลลิเมตร

แรงบิดในการขับเคลื่อน

แรงบิดที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนจากการหมุนเป็นเชิงเส้น

$$M_D = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (จ.1)$$

แรงบิดที่เกิดจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นเป็นการหมุน

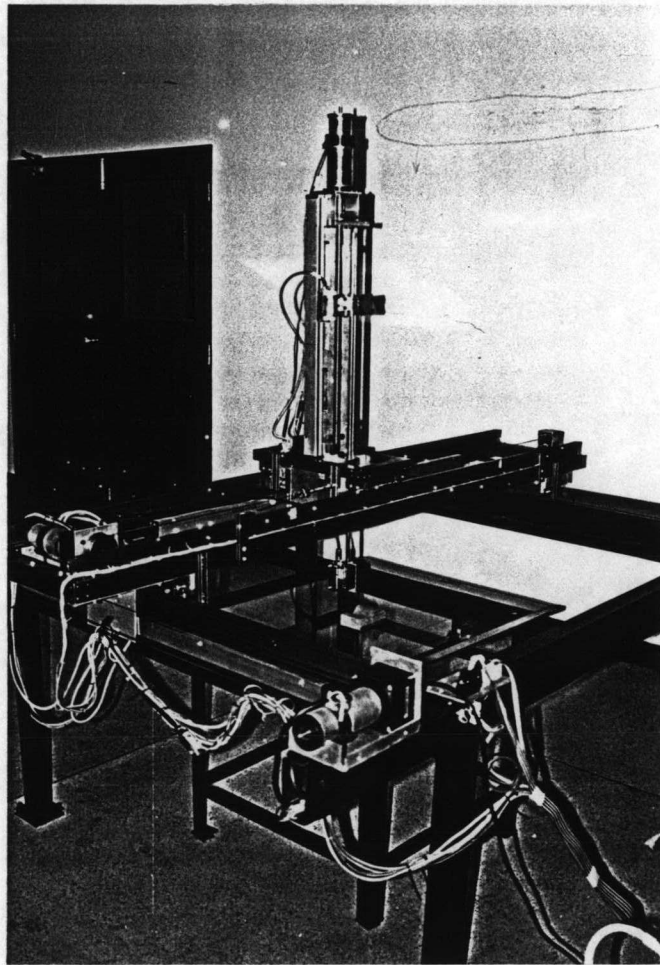
$$M_T = \frac{F \cdot P \cdot \eta'}{2000 \cdot \pi} \quad (จ.2)$$

M_D	=	แรงบิดในการขับเคลื่อน	(นิวตันเมตร)
M_T	=	แรงบิดที่ส่งออกมา	(นิวตันเมตร)
F	=	ภาระที่กระทำ	(นิวตัน)
P	=	ระยะเคลื่อนที่ต่อ 1 รอบการหมุน (มิลลิเมตร)	
η	=	ประสิทธิภาพทางกล	(ประมาณ 0.9)
η'	=	ประสิทธิภาพทางกล	(ประมาณ 0.8)

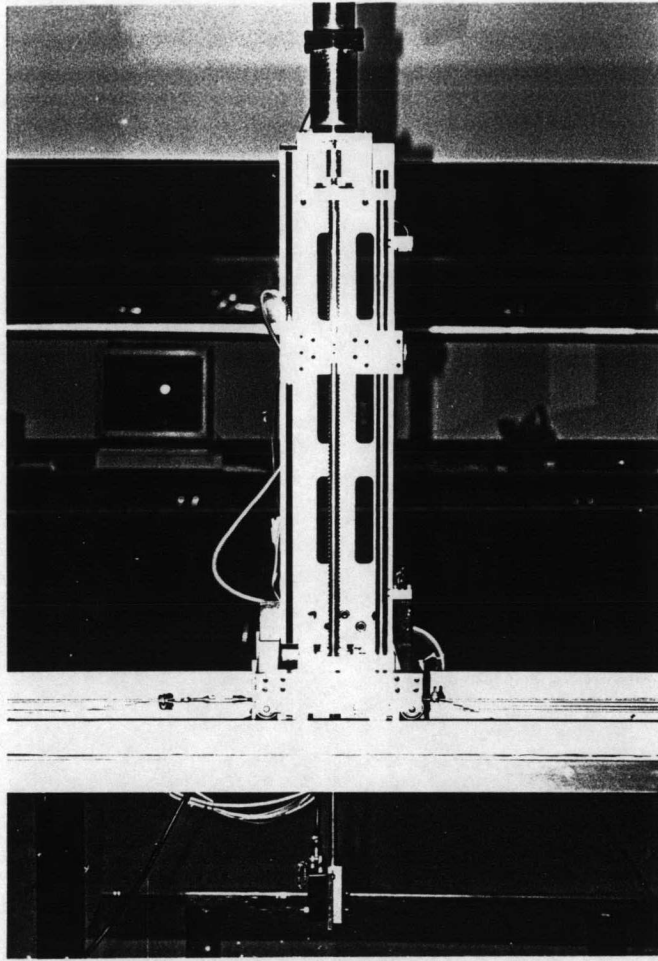
ภาคผนวก จ

รูปโต๊ะเคลื่อนที่ xyz

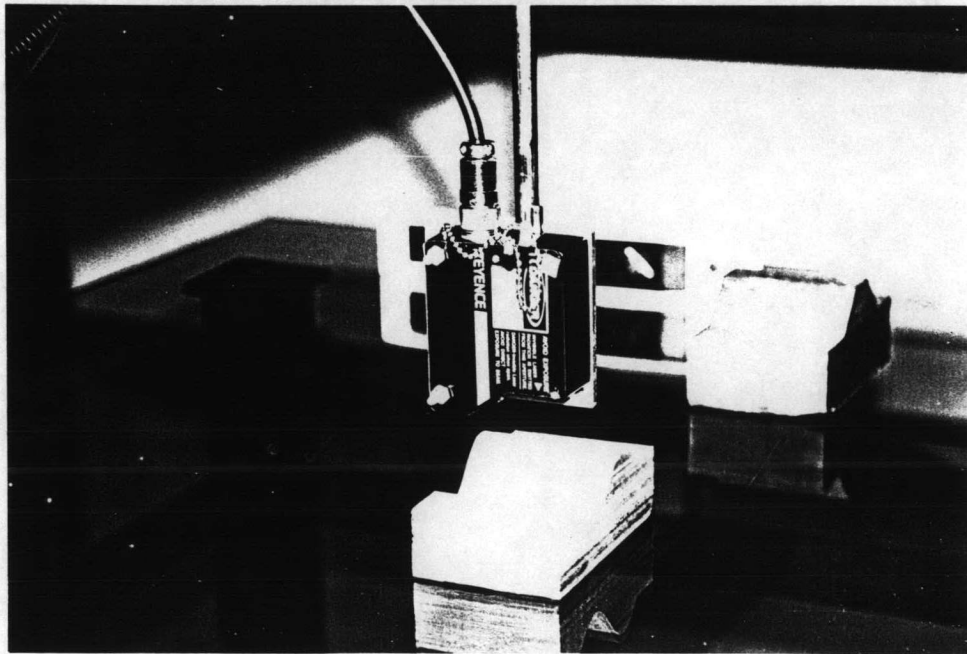
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ จ.1 แสดงภาพโต๊ะเคลื่อนที่



รูปที่ ๑.2 แสดงชุดเคลื่อนที่ในแนวแกน z

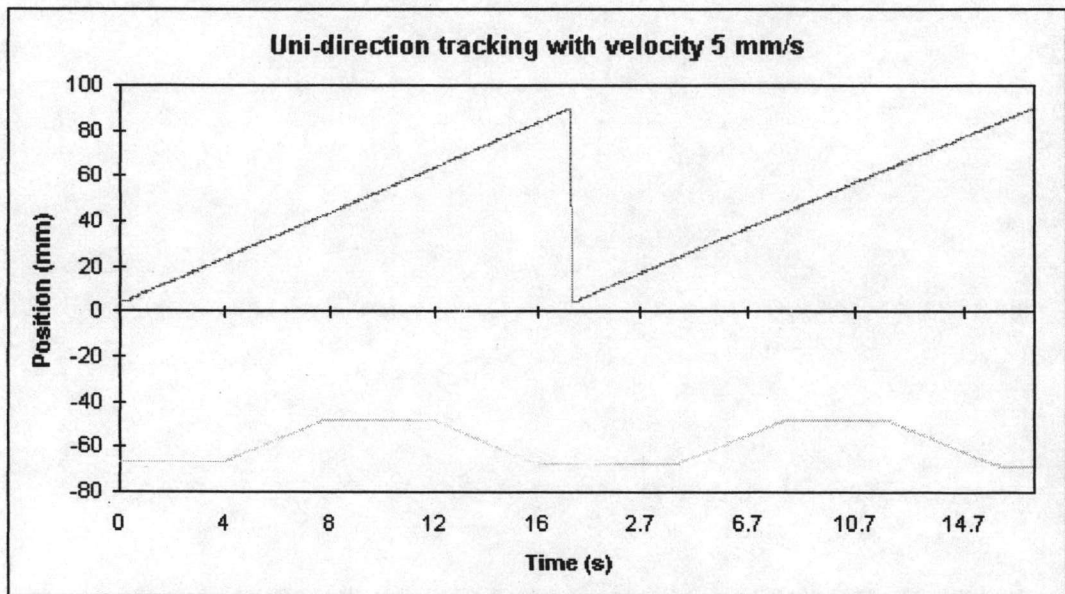


รูปที่ ๑.3 แสดงอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ขณะวัดชิ้นงาน

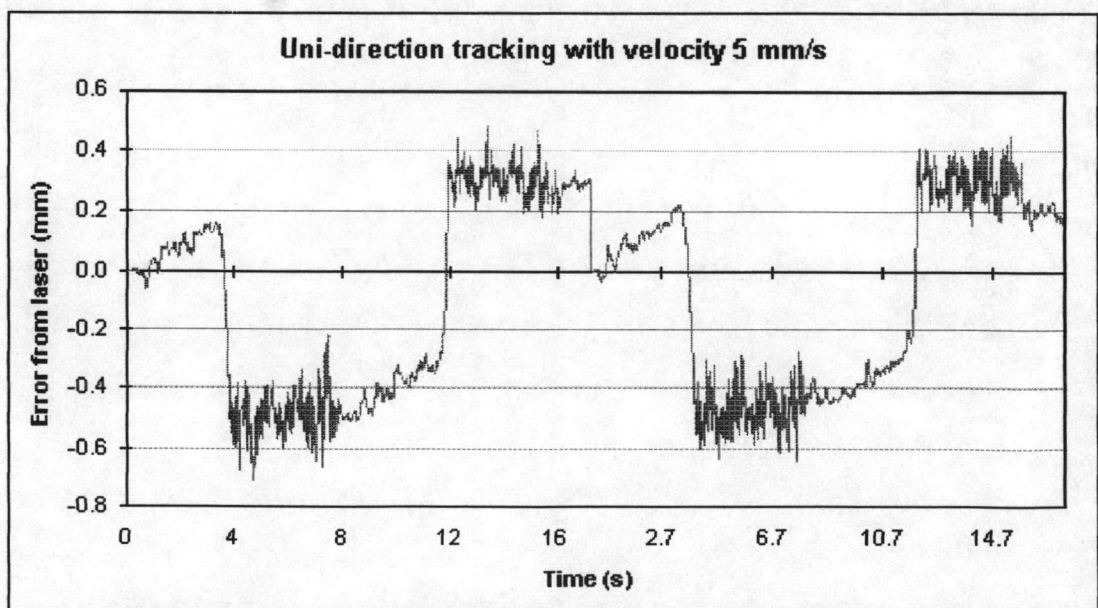
ภาคผนวก ข

ผลที่ได้จากการติดตามคอนทัวร์จากเลเซอร์ (แกน z)

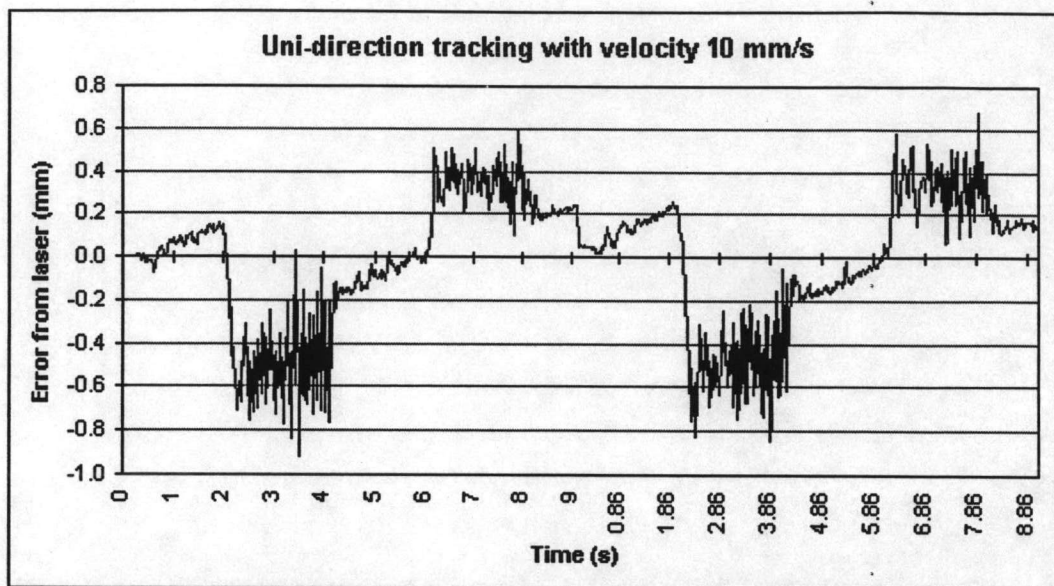
ผลจากการวัดชิ้นงานชิ้นที่ 1



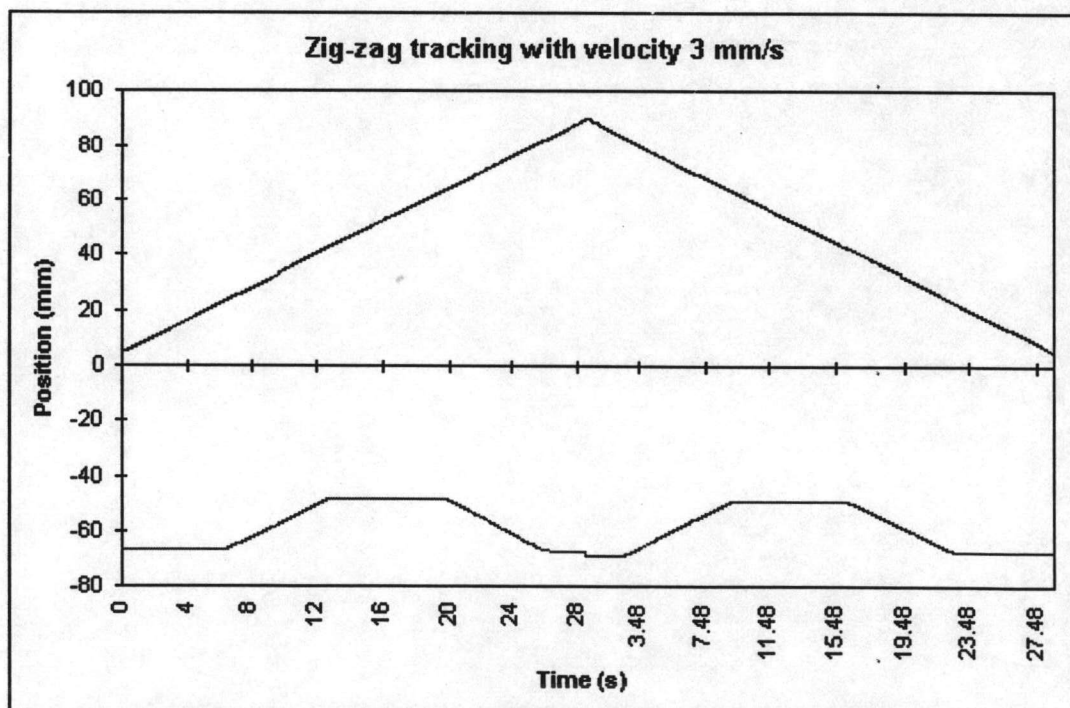
รูปที่ ข.1 ตำแหน่งแกน y,z ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบทิศทางเดียว



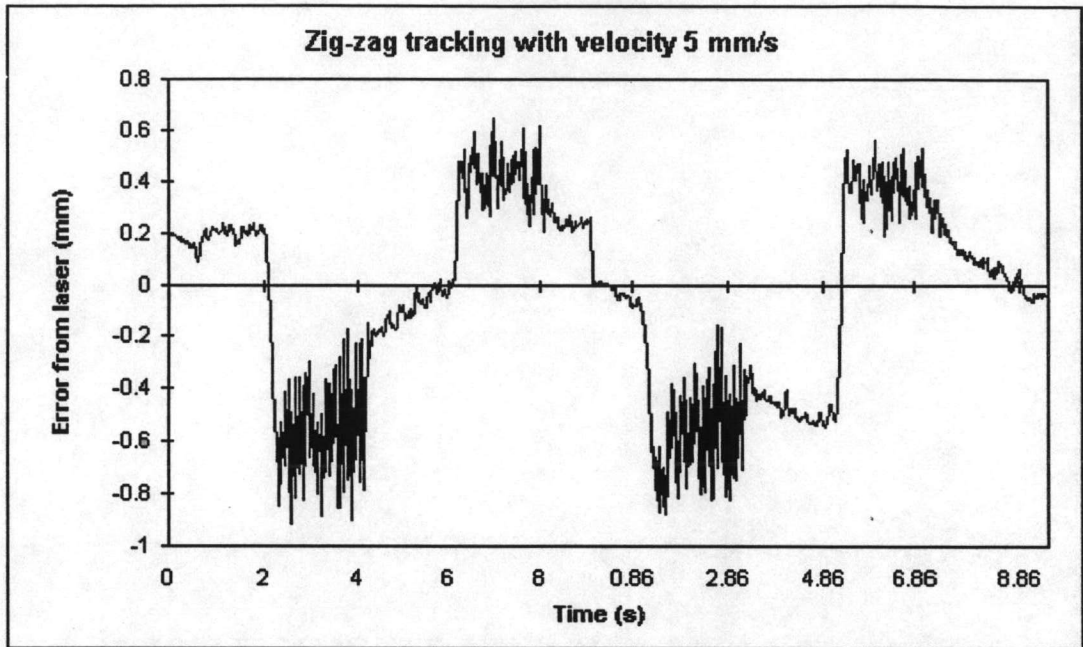
รูปที่ ข.2 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบทิศทางเดียวที่ 5 mm/s



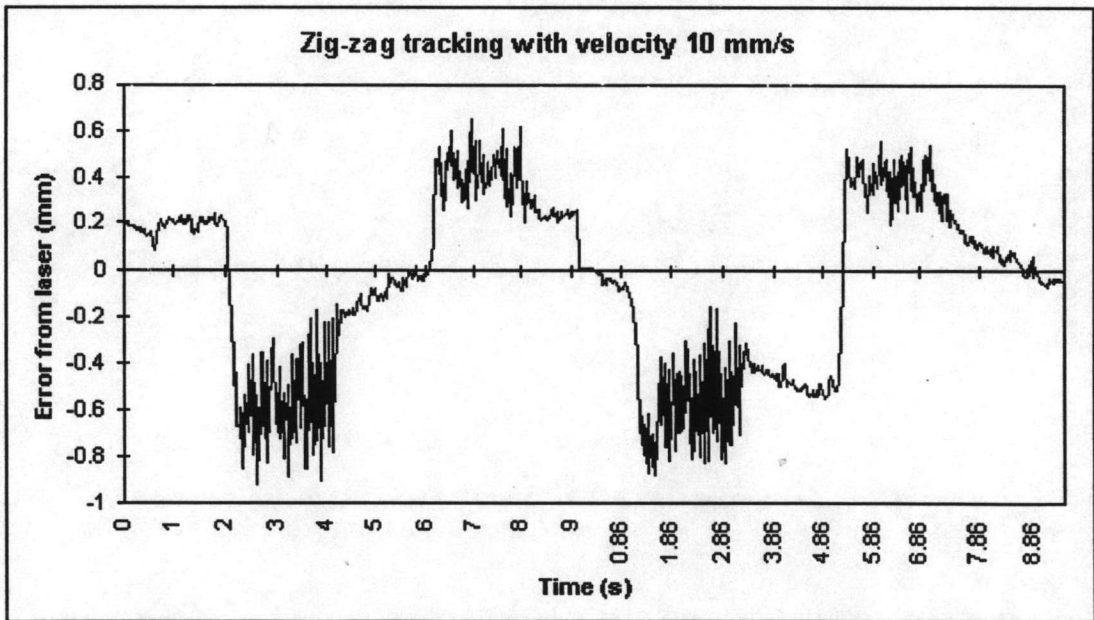
รูปที่ ๓.3 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบทิศทางเดียว ที่ 10 mm/s



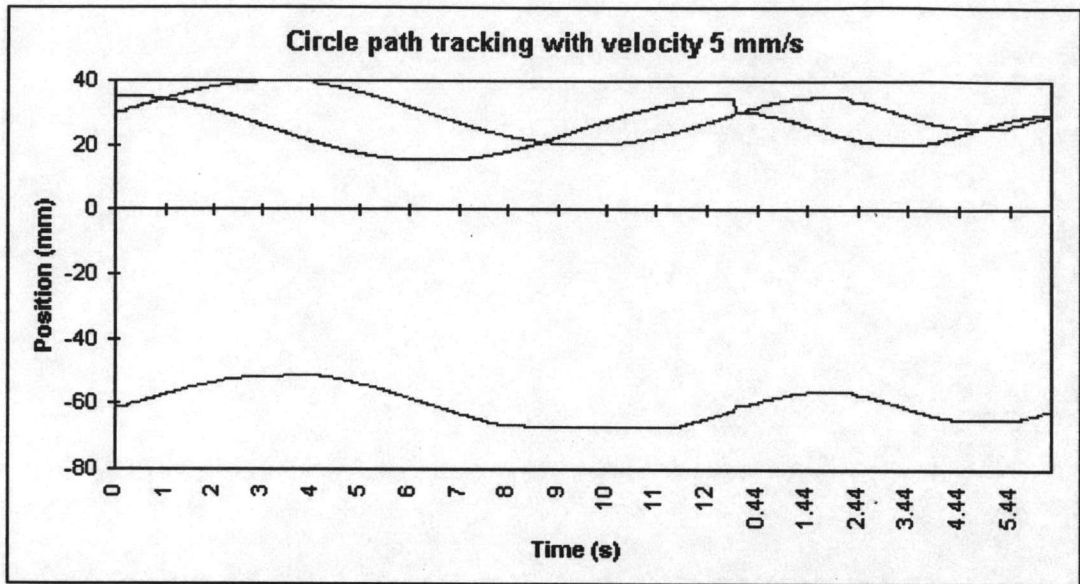
รูปที่ ๓.4 ตำแหน่งแกน y,z ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบไปกลับ



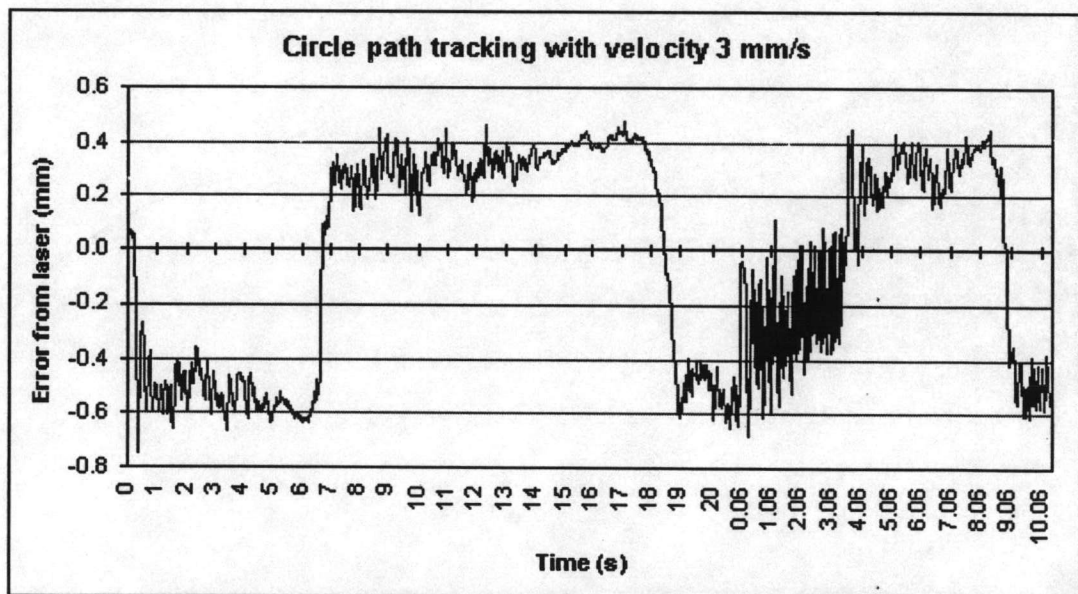
รูปที่ ข.5 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบไปกลับ ที่ 5 mm/s



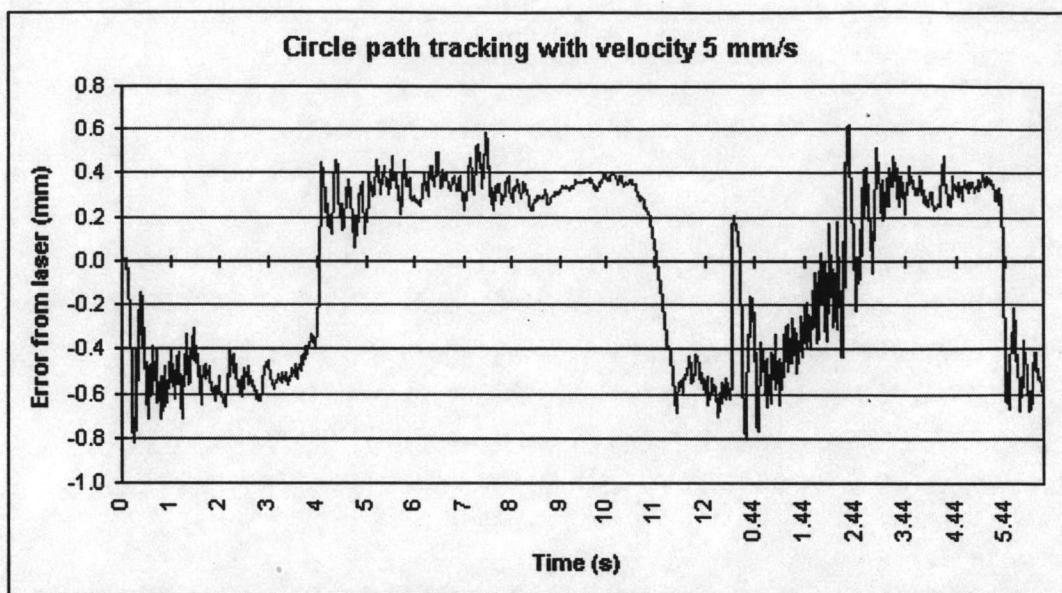
รูปที่ ข.6 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบไปกลับ ที่ 10 mm/s



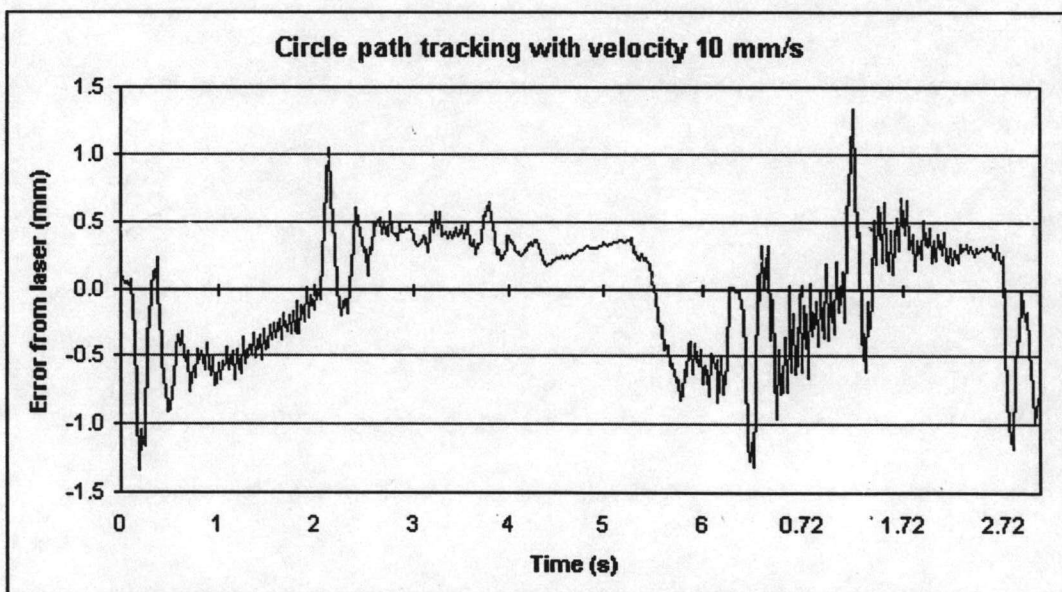
รูปที่ ข.7 ตำแหน่งแกน x,y,z ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบวงกลม



รูปที่ ข.8 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบวงกลม ที่ 3 mm/s

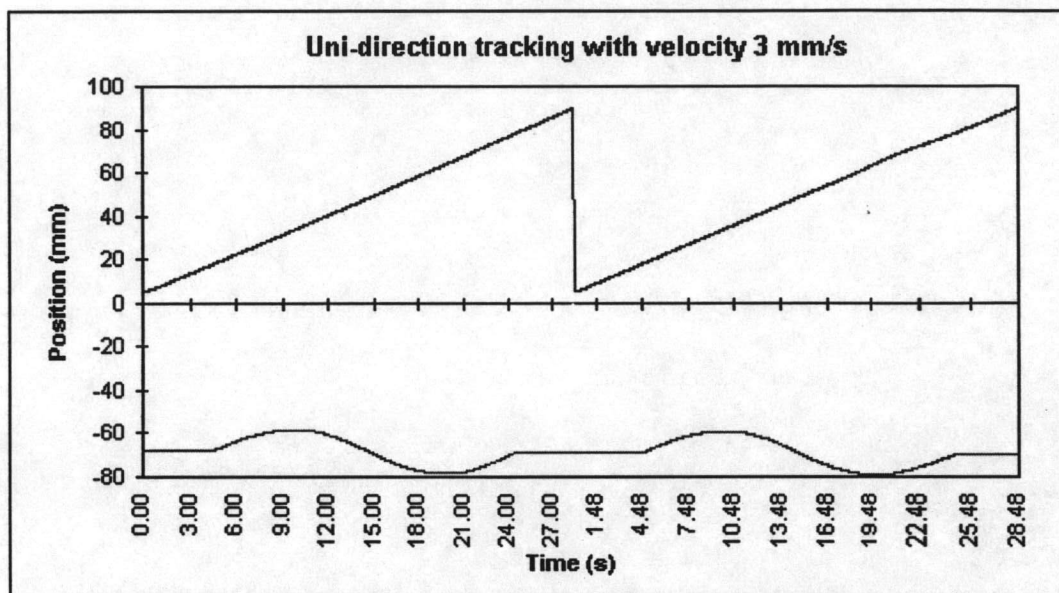


รูปที่ ๙.๙ ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบวงกลม ที่ 5 mm/s

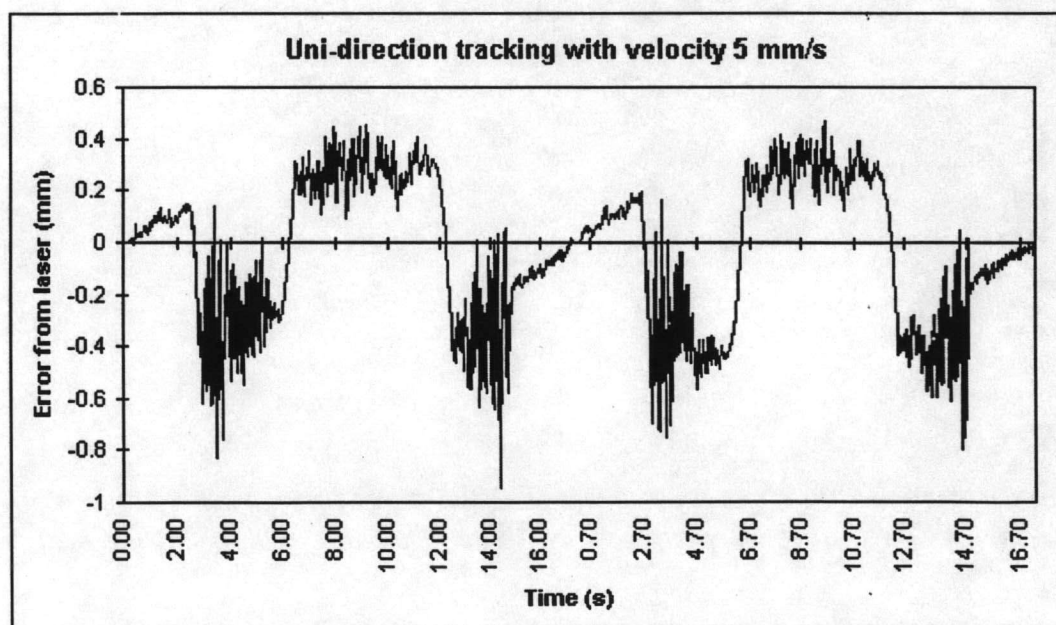


รูปที่ ๙.๑๐ ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 1 ทางเดินแบบวงกลม ที่ 10 mm/s

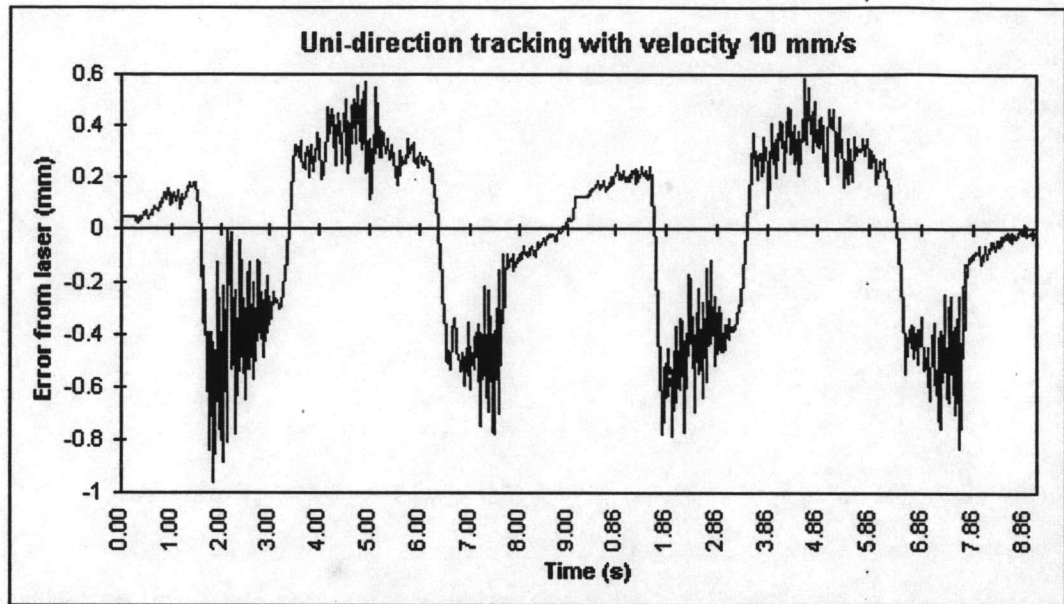
ผลจากการวัดชิ้นงานชั้นที่ 2



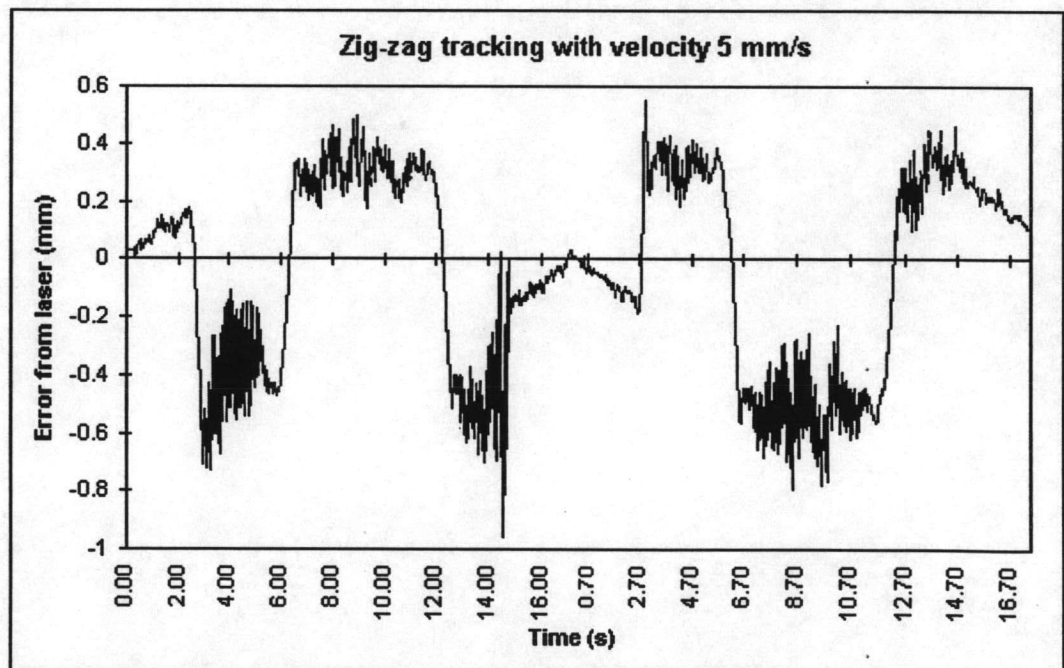
รูปที่ ข.11 ตำแหน่งแกน y,z ของชิ้นงานชั้นที่ 2 ทางเดินแบบทิศทางเดียว



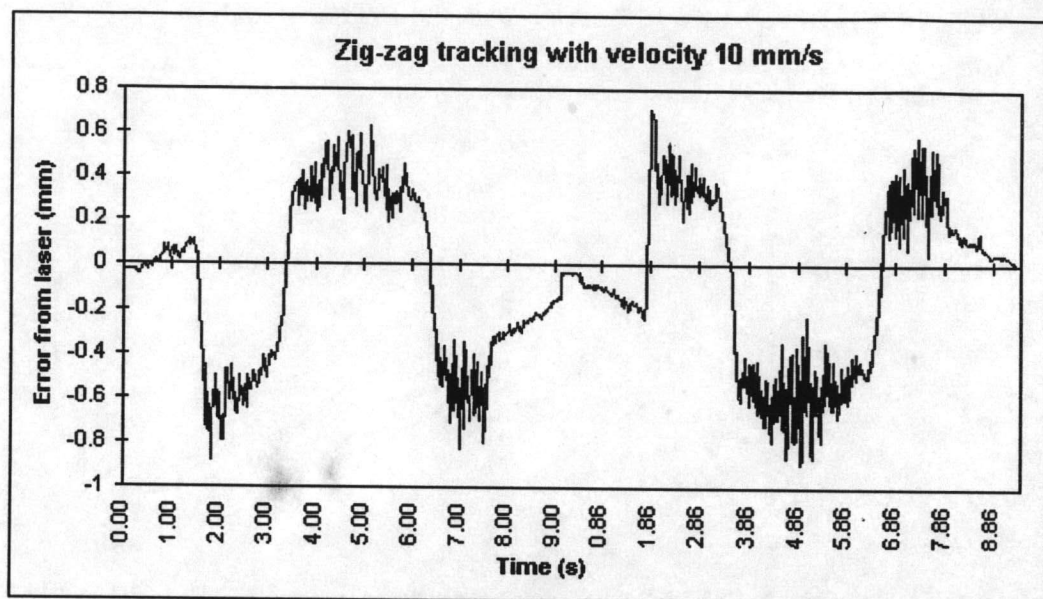
รูปที่ ข.12 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชั้นที่ 2 ทางเดินแบบทิศทางเดียวที่ 5 mm/s



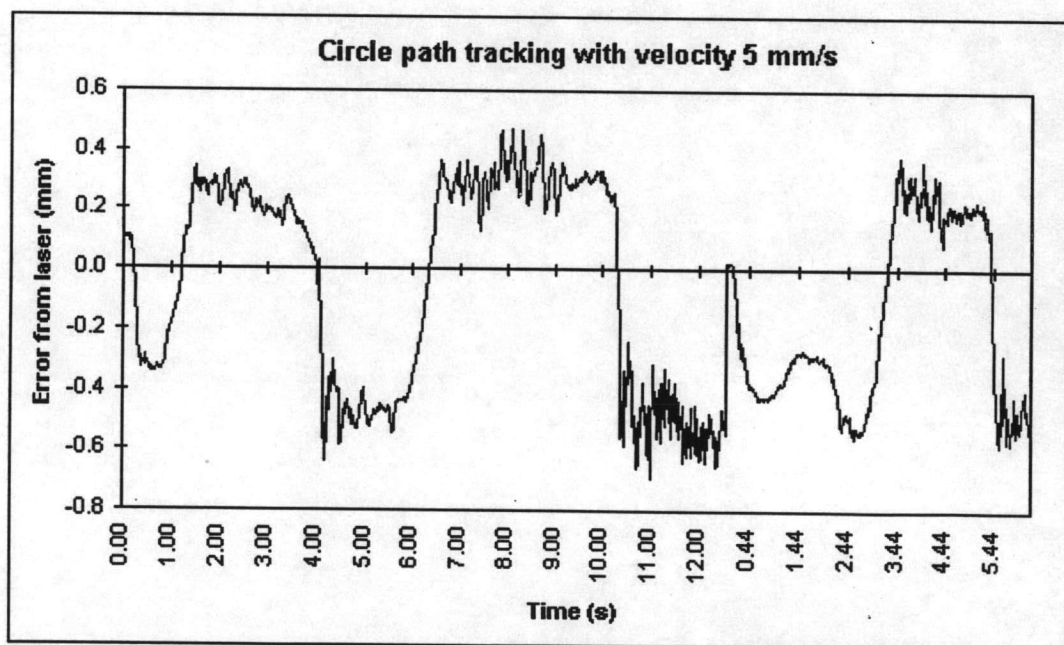
รูปที่ ข.13 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ทางเดินแบบทิศทางเดียวที่ 10 mm/s



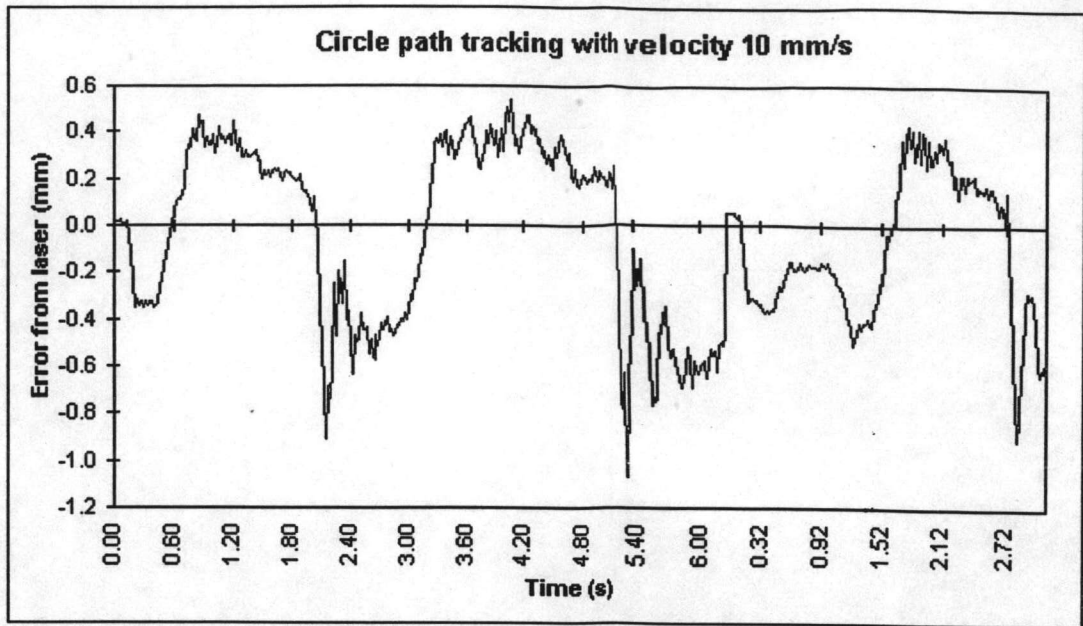
รูปที่ ข.14 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ทางเดินแบบไปกลับที่ 5 mm/s



รูปที่ ข.15 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ทางเดินแบบไปกลับที่ 10 mm/s



รูปที่ ข.16 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ทางเดินแบบวงกลมที่ 5 mm/s



รูปที่ ข.17 ค่าจากเลเซอร์ของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ทางเดินแบบวงกลมที่ 10 mm/s

ประวัติผู้เขียน

นาย ธเนศ เรืองธุระกิจ เกิดเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2512 ที่อำเภอเมืองระยอง จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2534 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย