

บทที่ 4

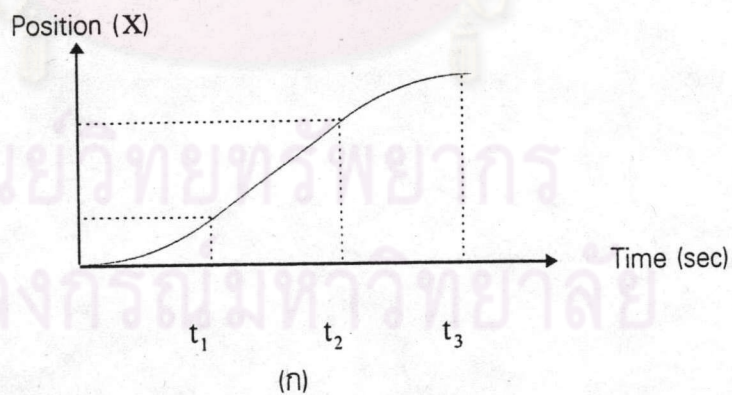
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

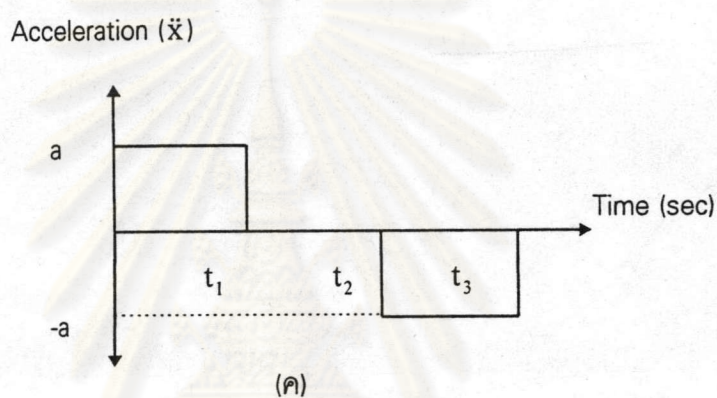
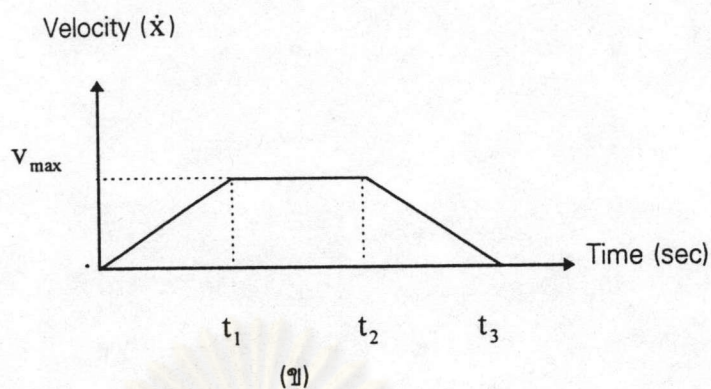
วิธีการทดลอง

ในการทดลองควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งนั้น จะแยกการทดลองออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะทดลองควบคุมตำแหน่งของแขนกลอย่างเดียวก่อน ส่วนที่สองเป็นการทดลองควบคุมแรงอย่างเดียว จากนั้นจึงทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งไปพร้อม ๆ กัน ดังนี้

1. การควบคุมตำแหน่ง

ในการทดลองควบคุมแบบตำแหน่งนั้น จะให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง โดยสัญญาณอ้างอิง (Reference command) ของการควบคุมตำแหน่งจะมีลักษณะเป็น s-curve ซึ่งคำนวณได้จากสัญญาณความเร็วที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoid) ดังแสดงในรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเคลื่อนที่

(ก) ระยะทาง

(ข) ความเร็ว

(ค) ความเร่ง

จากรูปที่ 4.1 ค่าที่กำหนด คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ (s) หรือพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 4.1ข และ เวลาที่ใช้

$$t_1 = t_2 = t_3 = 20 \text{ sec}$$

ฉะนั้น ระยะทางการเคลื่อนที่

$$s = 40 \cdot v_{\max}$$

จะได้

$$v_{\max} = \frac{s}{40}$$

ความเร่ง

$$a = \frac{s}{2 \cdot t^2}$$

ที่เวลา $0 \leq t \leq t_1$ จะได้

$$v = at$$

$$x = \frac{1}{2} at^2$$

ที่เวลา $t_1 \leq t \leq t_2$ จะได้

$$v = v_{\max}$$

$$x = \frac{1}{2} at_1^2 + v_{\max}(t - t_1)$$

ที่เวลา $t \geq t_2$ จะได้

$$v = v_{\max} - a(t - t_2)$$

$$x = \frac{1}{2} at_1^2 + v_{\max}(t_2 - t_1) - \frac{1}{2} a(t - t_2)^2$$

2. การควบคุมแรง

ในการทดลองควบคุมแรงนั้น จะให้แขนกลสัมผัสอยู่กับพื้นผิวชิ้นงานโดยไม่เคลื่อนที่ และจะควบคุมเฉพาะแรง ในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวที่ปลายแขนกลสัมผัสเท่านั้น ส่วนคำสั่งของแรงที่ใช้ทดลองจะเป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1 คำสั่งของแรงแบบ step
- 2.2 คำสั่งของแรงแบบ trapezoid
- 2.3 คำสั่งของแรงแบบ sine wave

3. การควบคุมแรงและตำแหน่ง

ในการทดลองควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งไปพร้อม ๆ กันนี้ จะให้แขนกลเคลื่อนที่ไปบนผิวชิ้นงาน ในทิศทางที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานตามคำสั่งของตำแหน่ง พร้อมกับปรับ Orientation ของแขนกล โดยให้เกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลตามคำสั่งของแรงที่ต้องการในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานนั้น

ในการทดลองนี้ผิวชิ้นงานที่แขนกลสัมผัสนั้นจะมีสองลักษณะคือ ผิวแบนเรียบและผิวโค้งทรงกระบอกโดยขณะทดลองจะใช้ข้อมูลจากแรงที่วัดได้นำมาคำนวณหาค่า normal vector และ

tangent vector ที่จุดใดๆของผิวชิ้นงาน จากนั้นก็จะควบคุมตำแหน่งในทิศทางของ tangent vector โดยใช้คำสั่งของตำแหน่งดังรูปที่ 4.1 และควบคุมแรงในทิศทางของ normal vector โดยใช้คำสั่งของแรงแบบ trapezoid

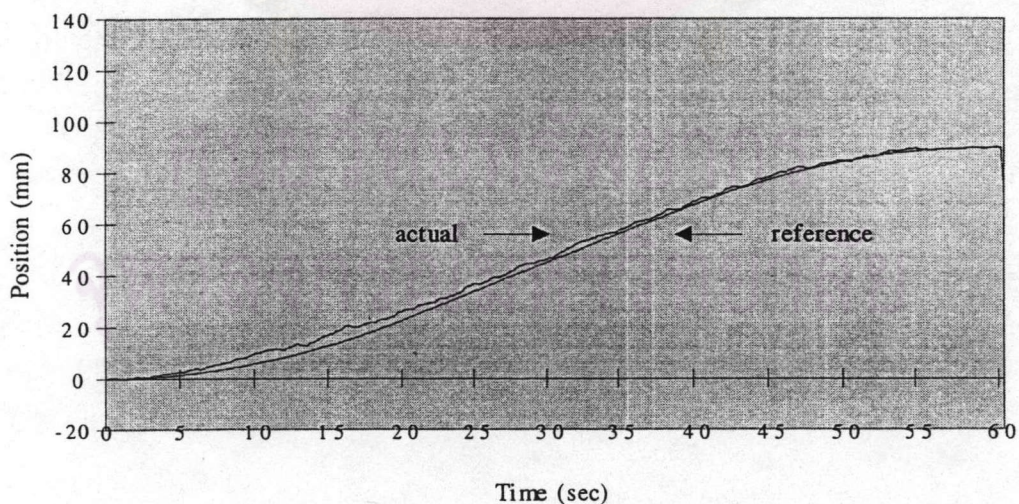
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนของวิธีทดลองนั้น จะแบ่งการทดลองเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) ทดลองควบคุมตำแหน่ง 2) ทดลองการควบคุมแรง และ 3) ทดลองควบคุมตำแหน่งและแรงไปพร้อม ๆ กัน ฉะนั้น จึงสามารถแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ลักษณะได้เช่นกัน ดังนี้

1. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ควบคุมตำแหน่ง

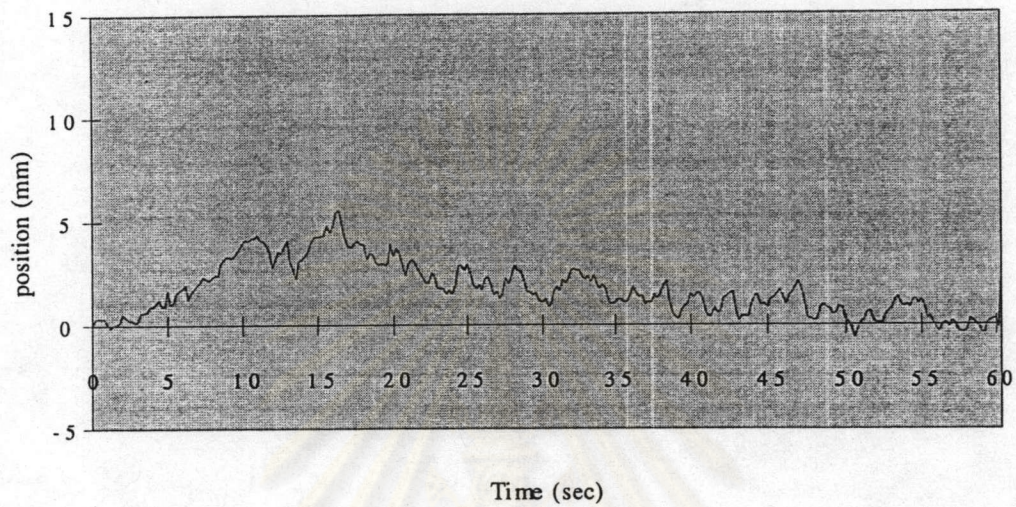
ในการทดลองควบคุมตำแหน่งนั้น จะกำหนดคำสั่งตำแหน่งใน Cartesian coordinate เป็นดังรูปที่ 4.1 และทดลองที่ความเร็วและระยะทางที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองดังกราฟต่อไปนี้

Position in cartesian coordinate



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของปลายแขนในระยะทาง 90 mm

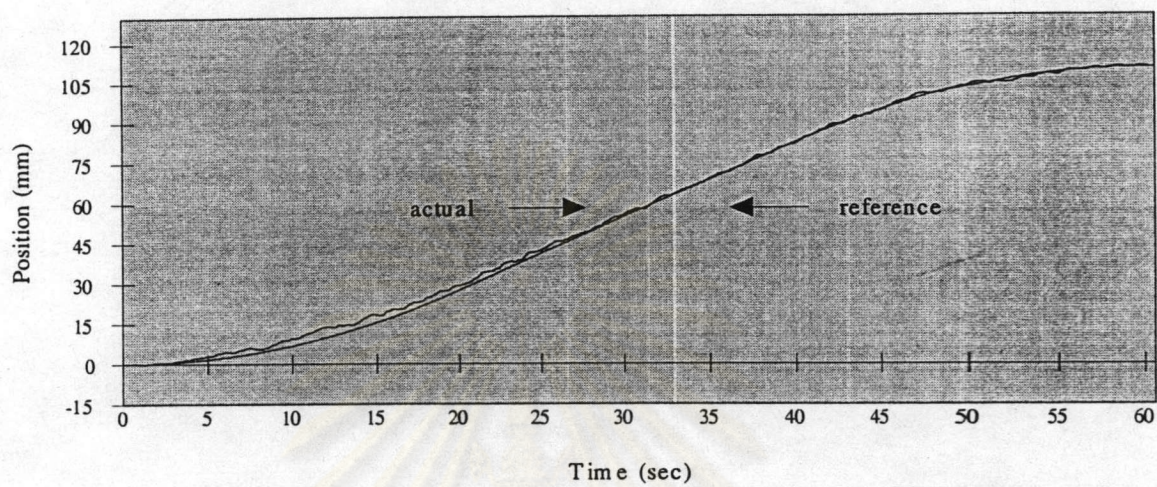
Position error



รูปที่ 4.3 ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 90 mm

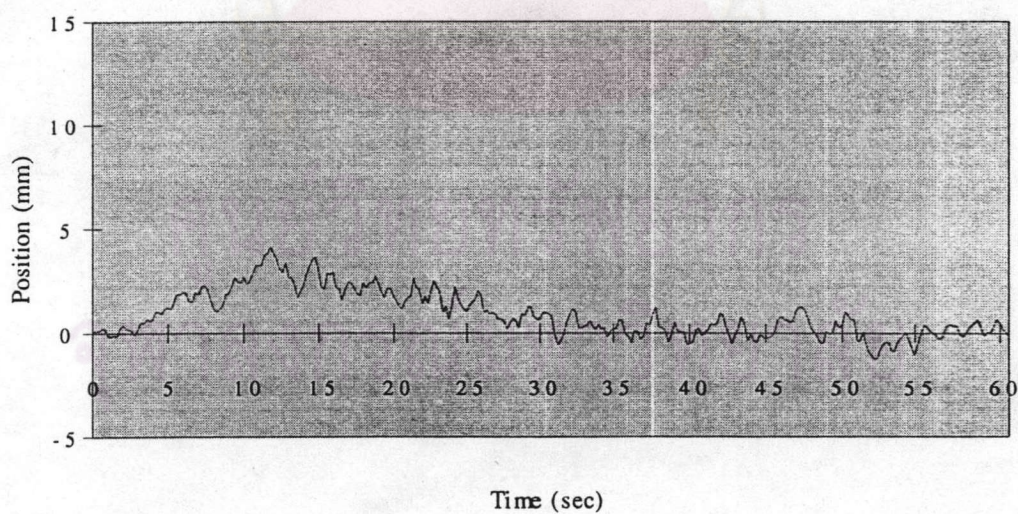
รูปที่ 4.2 ให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งของตำแหน่งในแนวเส้นตรง เป็นระยะทาง 90 mm โดยมีความเร็วสูงสุด 2.25 mm/sec และ ความเร่ง 0.1125 mm/sec^2 จะเห็นได้ว่าแนวทางเดินจริงของแขนกลค่อนข้างเรียบ และระยะทางที่เคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง แต่ก็มีค่าความผิดพลาดเล็กน้อยในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาเริ่มต้นค่าความผิดพลาดจะเริ่มจากศูนย์ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และจะมากที่สุดประมาณ 6 mm ที่เวลาประมาณ 16 วินาที จากนั้นก็จะลดลงเรื่อย ๆ โดยมีแนวโน้มวิ่งเข้าหาศูนย์จนหยุดการเคลื่อนที่

Position in cartesian coordinate



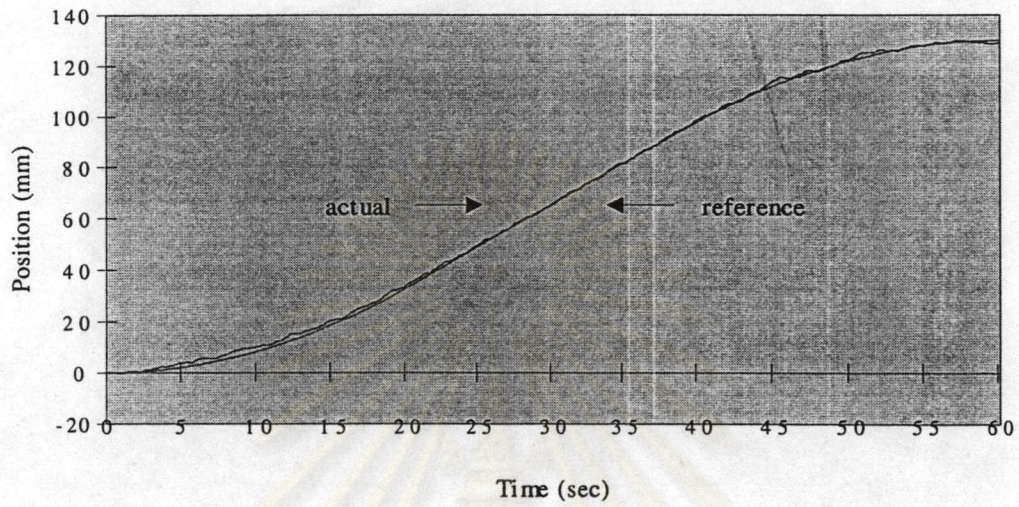
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของปลายแขนในระยะทาง 110 mm

Position error



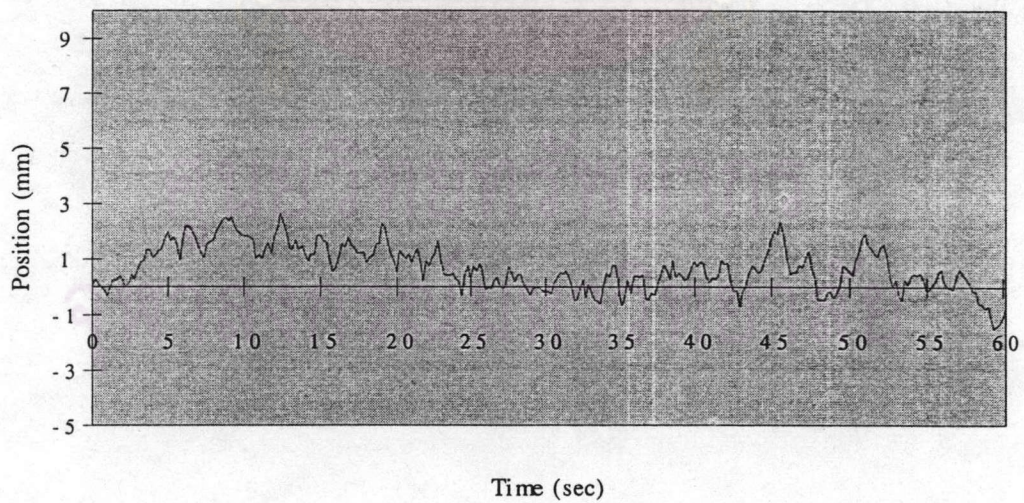
รูปที่ 4.5 ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนในระยะทาง 110 mm

Position in cartesian coordinate



รูปที่ 4.6 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 130 mm

Position error



รูปที่ 4.7 ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 130 mm

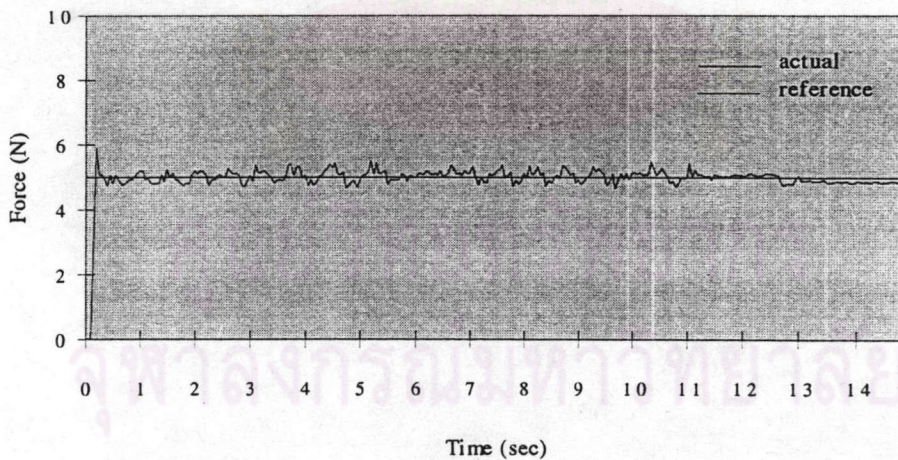
จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 ให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งของตำแหน่ง ในแนวเส้นตรง เป็นระยะทาง 110 mm (ความเร็วสูงสุด 2.75 mm/sec, ความเร่ง 0.1375 mm/sec^2) และ 130 mm (ความเร็วสูงสุด 3.25 mm/sec, ความเร่ง 0.1625 mm/sec^2) จะเห็นได้ว่า ลักษณะแนวทางเดินของ แขนกลจะเหมือนกันกับกรณี เคลื่อนที่เป็นระยะทาง 90 mm คือระยะทางที่เคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียง กับค่าอ้างอิง แต่ก็มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จากนั้นก็จะลดลงเรื่อย ๆ โดยมีแนวโน้มวิ่งเข้าหาศูนย์เช่นกัน

2. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ควบคุมแรง

ในการทดลองควบคุมแรงนั้นจะกำหนดคำสั่งของแรงให้มีขนาดต่าง ๆ กันเป็น 3 ลักษณะ คือแบบ step , trapezoid และ sin wave ขณะทดลองจะให้ปลายแขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยไม่มีการเคลื่อนที่ ได้ผลการทดลองดังกราฟต่อไปนี้

2.1 คำสั่งแรงแบบ step

Step force response

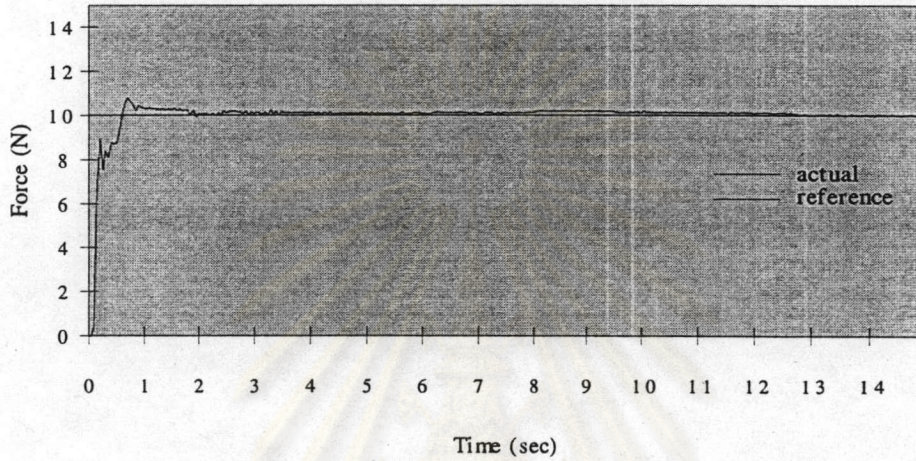


รูปที่ 4.8 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 5 N

รูปที่ 4.8 ให้แขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยแรงขนาด 5 N จะเห็นได้ว่า แขนกลสามารถตอบสนองต่อคำสั่งของแรงแบบ step ได้ดี จากรูปจะเกิด percent overshoot

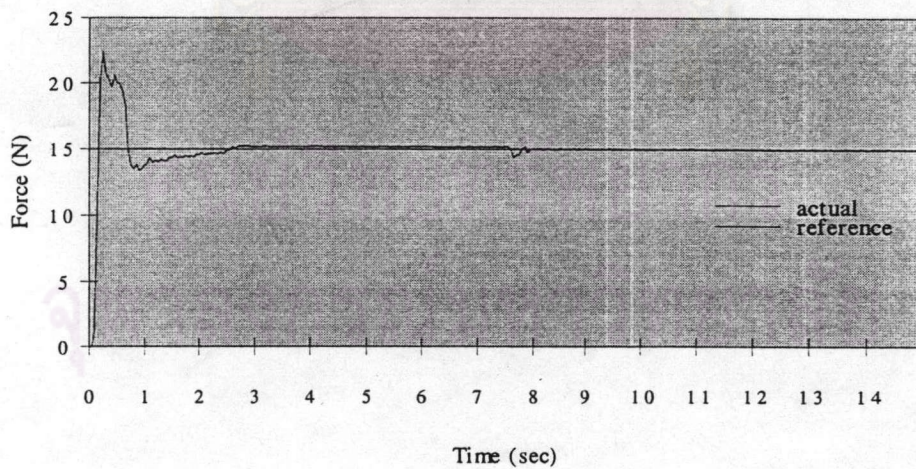
overshoot ประมาณ 20 %, rise time ประมาณ 0.2 sec, setting time ประมาณ 0.5 sec ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงที่เกิดขึ้น ที่ปลายแขนกลนั้น สามารถเข้าสู่ค่าสั่งของแรงได้อย่างรวดเร็ว

Step force response



รูปที่ 4.9 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 10 N

Force response

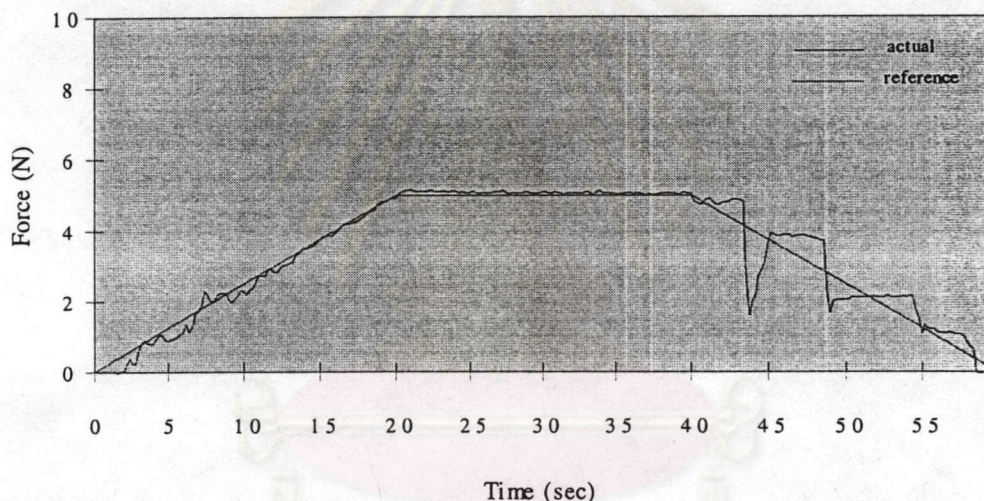


รูปที่ 4.10 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 15 N

รูปที่ 4.9 และ 4.10 ให้แขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยแรงขนาด 10 N และ 15 N จะเห็นได้ว่า แขนกลสามารถตอบสนองต่อคำสั่งของแรงแบบ step ได้ดีเช่นเดียวกับคำสั่งของแรงขนาด 5 N แต่จากรูปจะเกิด percent overshoot สูงมากขึ้นเมื่อขนาดคำสั่งของแรงมีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลนั้น ก็ยังคงลู่เข้าสู่คำสั่งของแรงได้อย่างรวดเร็ว

2.2 คำสั่งของแรงแบบ Trapezoid

Force response

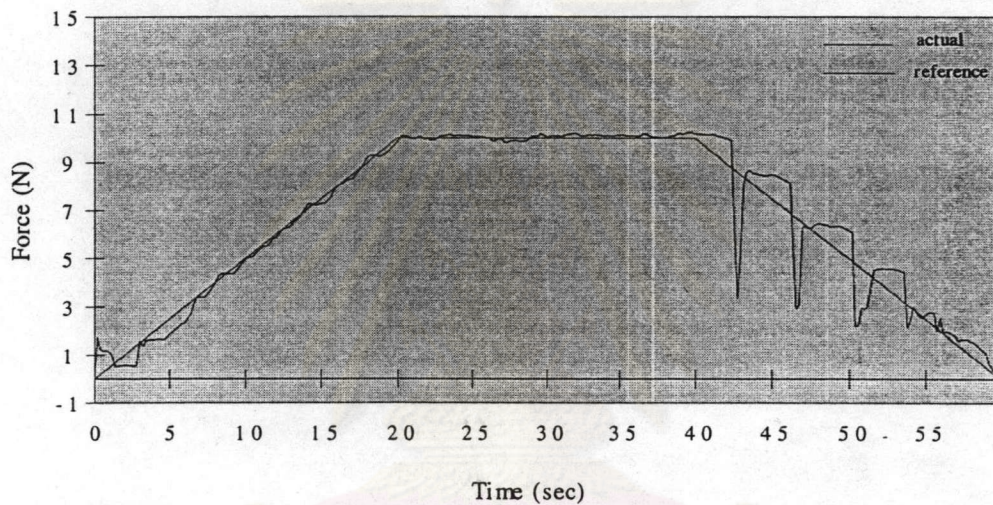


รูปที่ 4.11 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 5 N

รูปที่ 4.11 ให้แขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยมีขนาดของแรงสูงสุด 5 N จากรูปจะเห็นว่าแขนกลสามารถตอบสนองต่อคำสั่งของแรงแบบ Trapezoid ได้ดี โดยช่วงเวลาที่คำสั่งของแรงมีความเร่ง แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลค่อนข้างเรียบและสามารถ Track คำสั่งของแรงได้ดี โดยช่วงเวลาเริ่มต้นจะเกิดค่าผิดพลาดของแรงสูงสุดประมาณ 0.5 N จากนั้นก็จะลู่เข้าหาคำสั่งของแรง ช่วงถัดไปเป็นช่วงคำสั่งของแรงมีขนาดคงที่ แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลจะเรียกว่าช่วงแรกและ Track คำสั่งของแรงได้ดี ส่วนช่วงสุดท้ายคำสั่งของแรงมีความหน่วง แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกล

แขนกลไม่ค่อยเรียบนัก ค่าความผิดของแรงในช่วงนี้ค่อนข้างจะแกว่งมีค่าเป็นบวกเป็นลบสลับกันไปมา ทั้งนี้จากรูปช่วงที่คำสั่งของแรงเริ่มลดลงจากค่าสูงสุด แขนกลจะพยายามเคลื่อนที่ถอยออก จากจุดที่ปลายแขนกลสัมผัสเพื่อลดแรงที่เกิดขึ้น และเนื่องจาก backlash ของข้อต่อแขนกลจึงเกิดการสะดุดขึ้น แต่ทั้งนี้ก็สามารถเห็นแนวโน้มได้ว่าขนาดของความผิดพลาดค่อย ๆ ลดลง ซึ่งหมายถึงแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลนั้นกำลังลู่เข้าหาคำสั่งของแรงที่ต้องการ

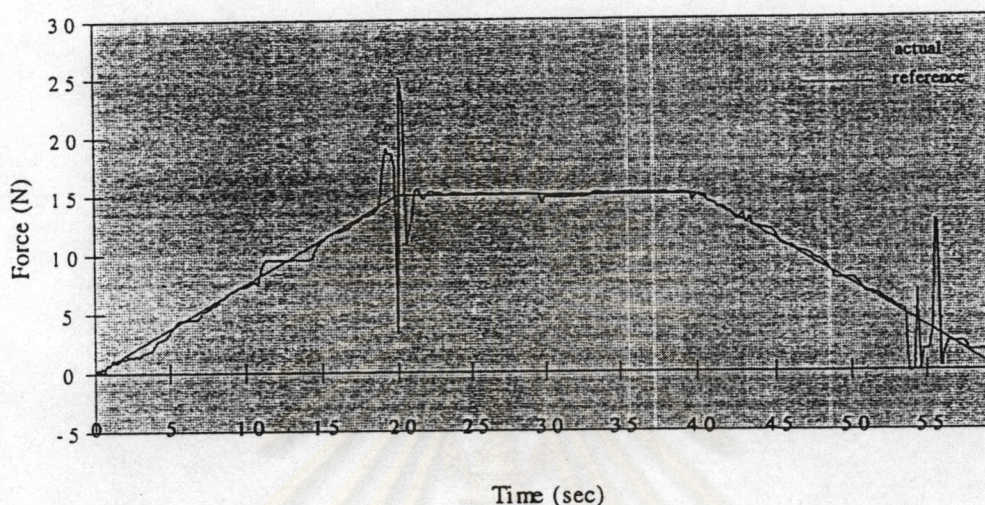
Force response



รูปที่ 4.12 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 10 N

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Force response



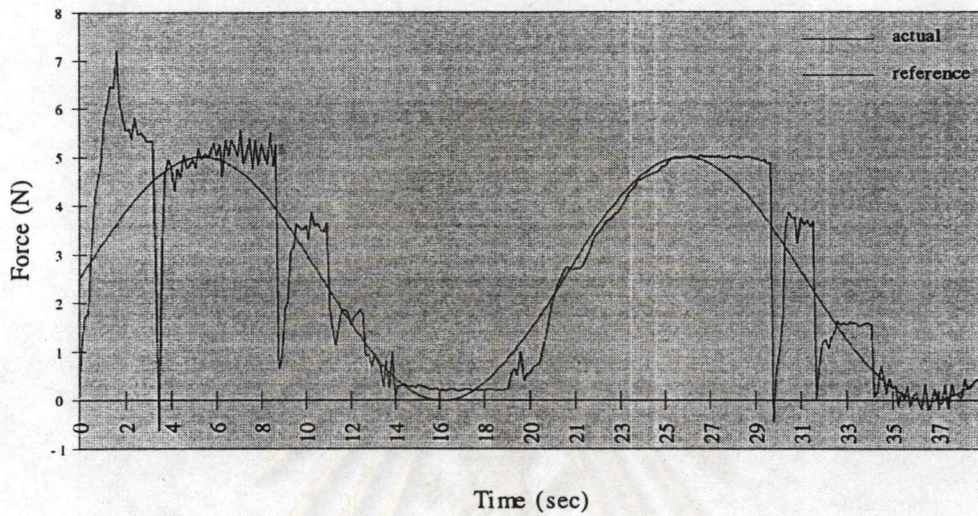
รูปที่ 4.13 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N

รูปที่ 4.12 และ 4.13 ให้แขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยมีขนาดของแรงสูงสุด 10 N และ 15 N จากรูปจะเห็นได้ว่าแขนกลสามารถตอบสนองต่อคำสั่งของแรงแบบ Trapezoid ได้ดีเช่นเดียวกันกับกรณีแรงสูงสุดขนาด 5 N โดยช่วงเวลาที่คำสั่งของแรงมีความเร่ง และช่วงคำสั่งของแรงมีขนาดคงที่ แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลค่อนข้างเรียบและสามารถ Track คำสั่งของแรงได้ดี ส่วนช่วงสุดท้ายคำสั่งของแรงมีความหน่วง แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลไม่ค่อยเรียบนักก็เนื่องมาจาก backlash ของข้อต่อแขนกล แต่กรณีรูปที่ 4.13 ช่วงสุดท้ายคำสั่งของแรงมีความหน่วง แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลกลับเรียบขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของแรงสูงสุดมีค่ามากขึ้นเป็น 15 N flexibilities ของชุดส่งกำลัง harmonic drive และโครงสร้างของแขนกล จึงช่วยลดผลกระทบของ backlash ลงไป

2.3 คำสั่งของแรงแบบ Sine Wave

2.3 คำสั่งของแรงแบบ Sine Wave

Sine wave force response

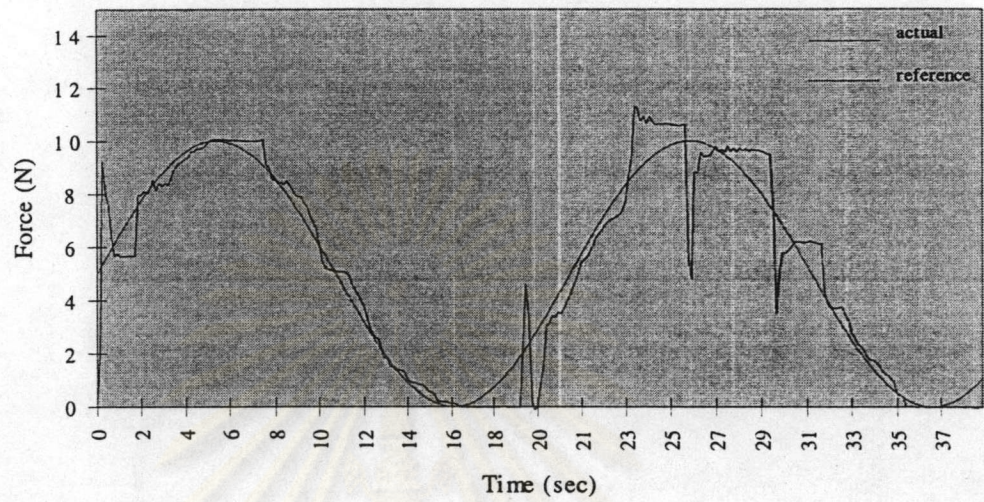


รูปที่ 4.14 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave โดยมี amplitude 5 N

รูปที่ 4.14 ให้แขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยมีขนาดของแรง Amplitude เท่ากับ 5 N จากรูปจะเห็นได้ว่าแขนกลสามารถตอบสนองคำสั่งของแรงแบบ Sine Wave ได้ แต่ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลจะไม่ค่อยเรียบนัก โดยเฉพาะช่วงด้านหลังของห้องคลื่นและยอดคลื่นของคำสั่งของแรง ทั้งนี้เนื่องมาจาก backlash ของแขนกลนั่นเอง

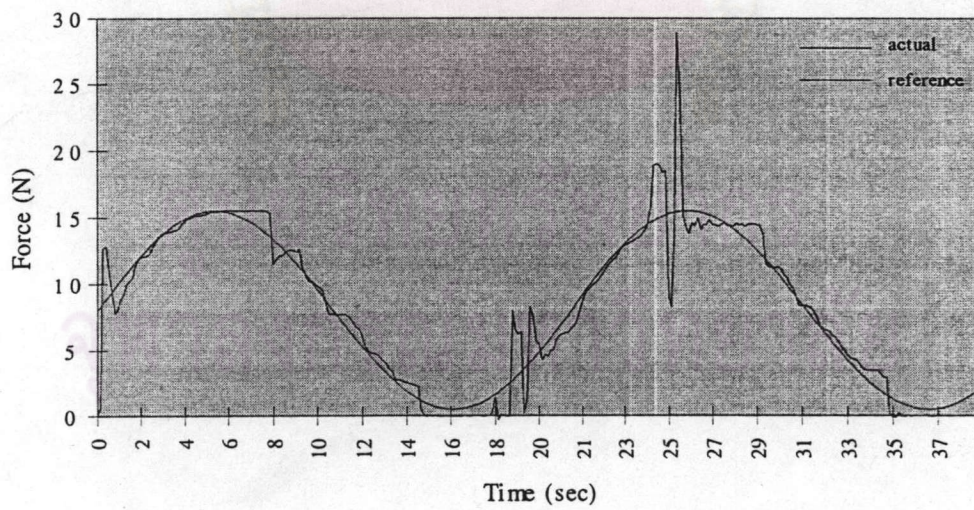
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Force response



รูปที่ 4.15 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave โดยมี amplitude 10 N

Force response

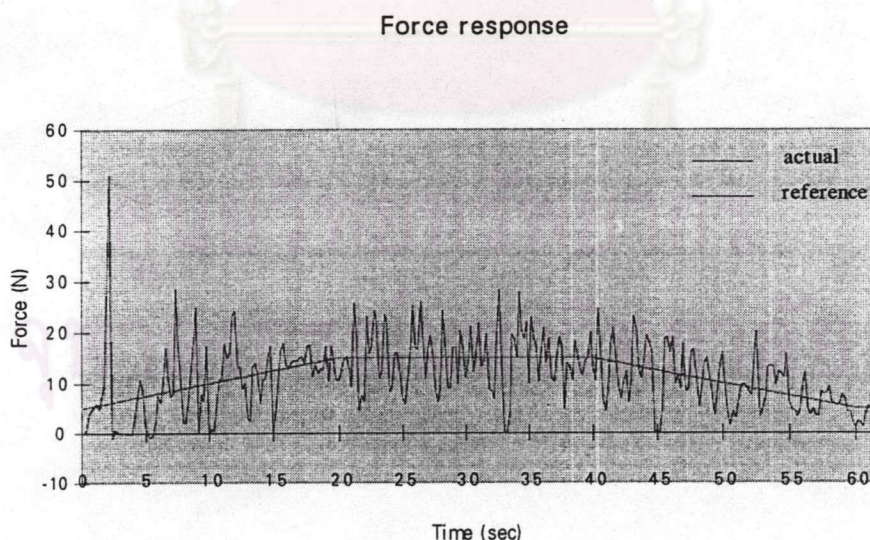


รูปที่ 4.16 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave โดยมี amplitude 15 N

รูปที่ 4.15 ให้แกนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานโดยมีขนาดของแรง Amplitude เท่ากับ 10 N จากรูปจะเห็นได้ว่าแกนกลสามารถตอบสนองคำสั่งของแรงแบบ Sine Wave ได้ แต่ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแกนกลบางช่วง จะไม่ค่อยเรียบเช่นเดียวกันกับขนาดของแรง Amplitude เท่ากับ 5 N โดยเฉพาะช่วงด้านหลังของห้องคลื่น และยอดคลื่นของคำสั่งของแรง แต่กรณีรูปที่ 4.16 แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแกนกลจะเรียบขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของแรง Amplitude มีค่ามากขึ้นเป็น 15 N flexibilities ของชุดส่งกำลัง harmonic drive และโครงสร้างของแกนกล จึงช่วยลดผลกระทบของ backlash ลงไป

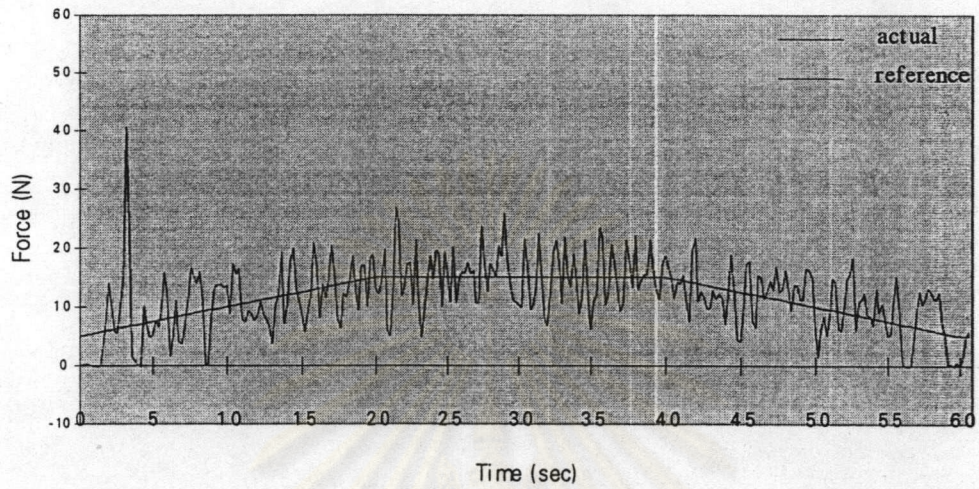
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ควบคุมแรงและตำแหน่ง

ในการทดลองนี้ นอกจากจะควบคุมแรงและตำแหน่งแล้ว ยังคำนวณหาค่า normal vector และ tangent vector ณ จุดที่ปลายแกนกลสัมผัสด้วย ซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถบอกถึงรูปร่างของผิวชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังบอกถึงทิศทางที่ใช้ควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยทิศทางของ normal vector จะควบคุมแรง และ ทิศทางของ tangent vector จะควบคุมตำแหน่ง ส่วนคำสั่งของตำแหน่งที่ใช้ในการทดลองจะเป็นดังรูป 4.1 และทางเดินของปลายแกนกลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของผิวชิ้นงาน ส่วนคำสั่งของแรงจะเป็นแบบ Trapezoid ที่ขนาดต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังกราฟต่อไปนี้



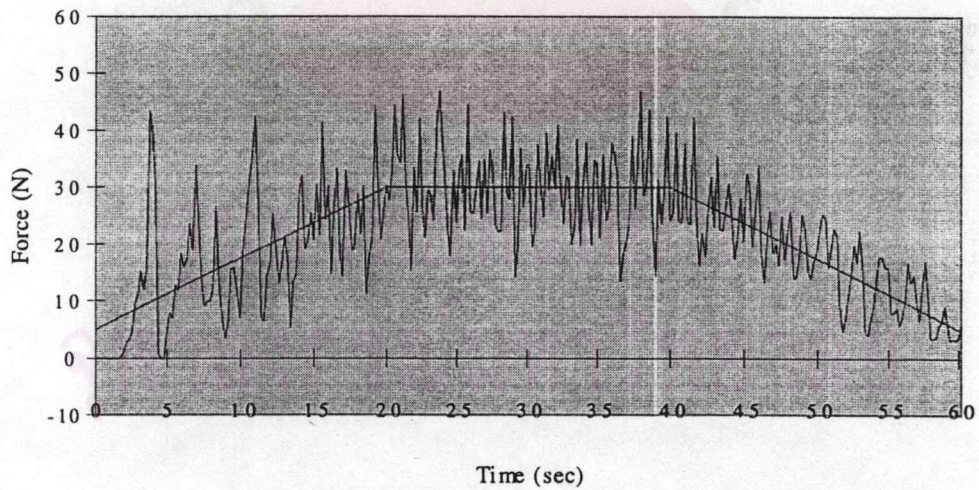
รูปที่ 4.17 แรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ

Force response



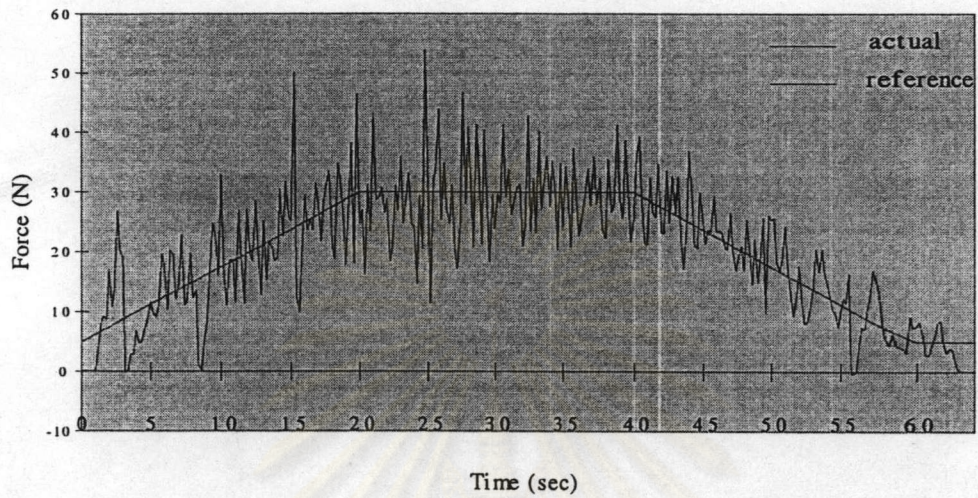
รูปที่ 4.18 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N
ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ

Force response



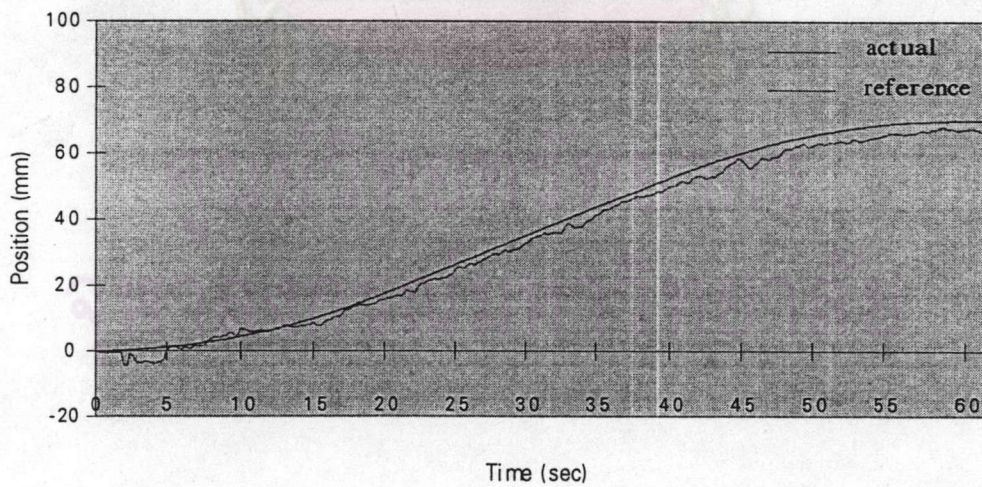
รูปที่ 4.19 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N
ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ

Force response



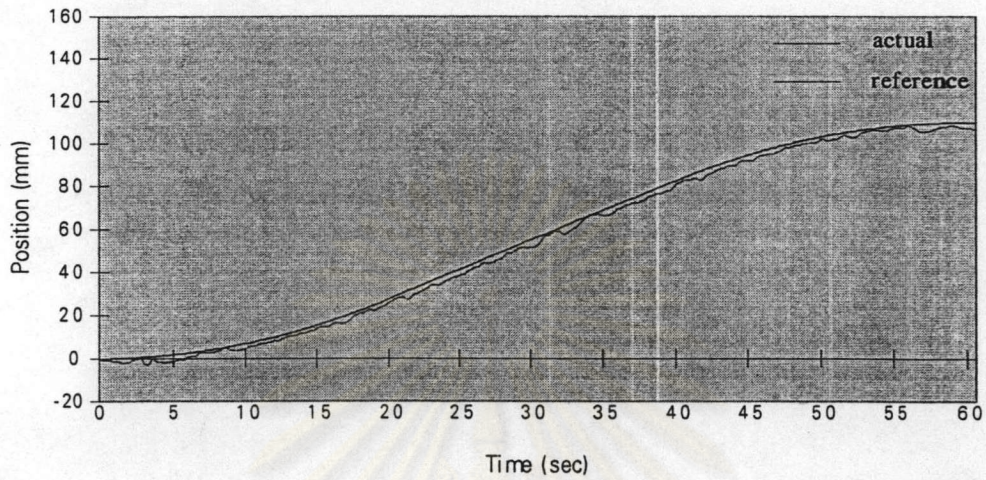
รูปที่ 4.20 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ

Position response



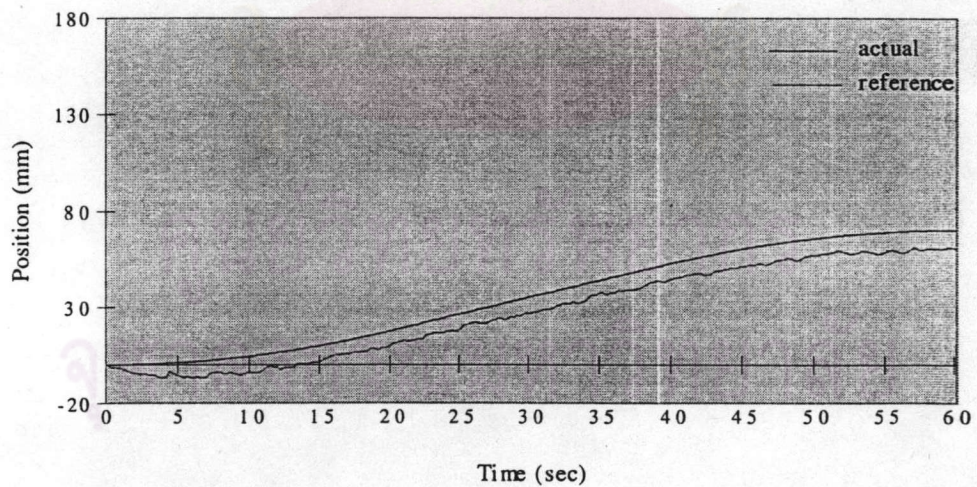
รูปที่ 4.21 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Position response



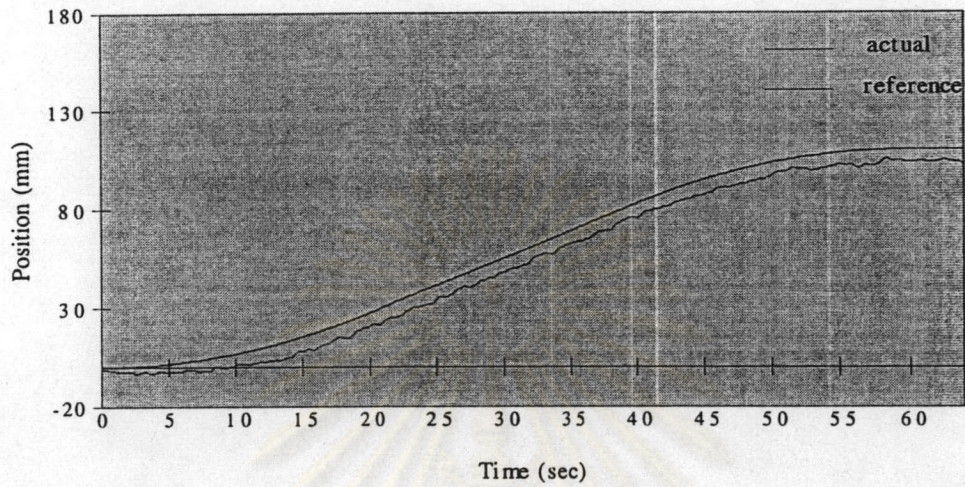
รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนที่นั่งงานผิวแบนเรียบ
ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Position response



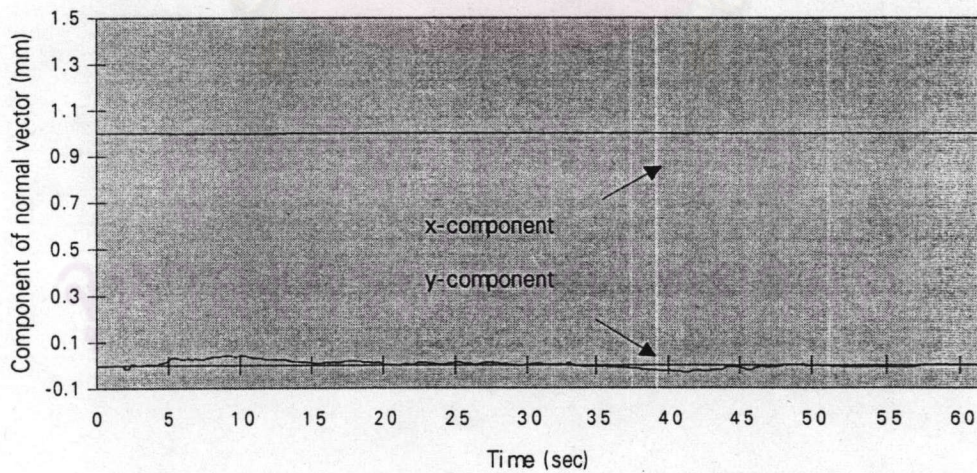
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนที่นั่งงานผิวแบนเรียบ
ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Position response



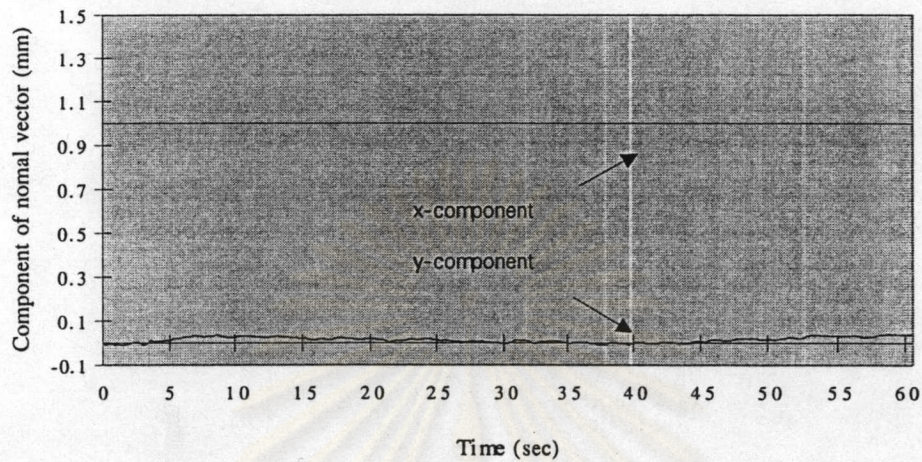
รูปที่ 4.24 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Estimation of normal vector



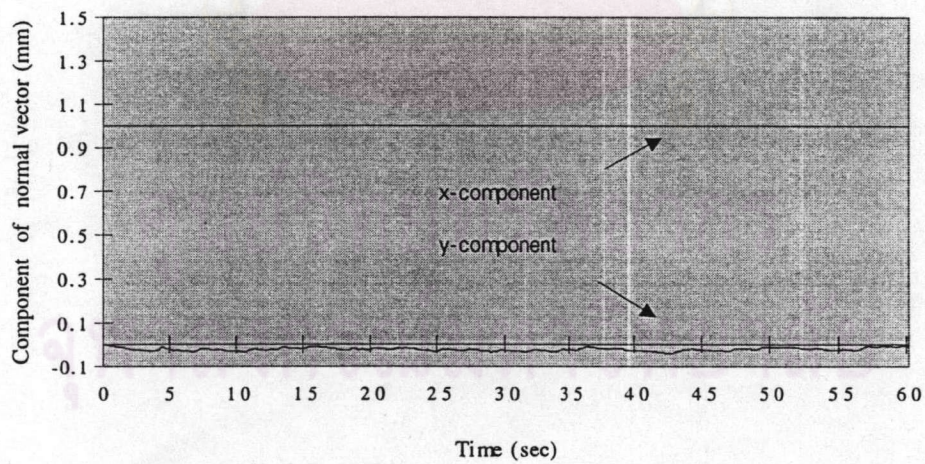
รูปที่ 4.25 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Estimation of normal vector



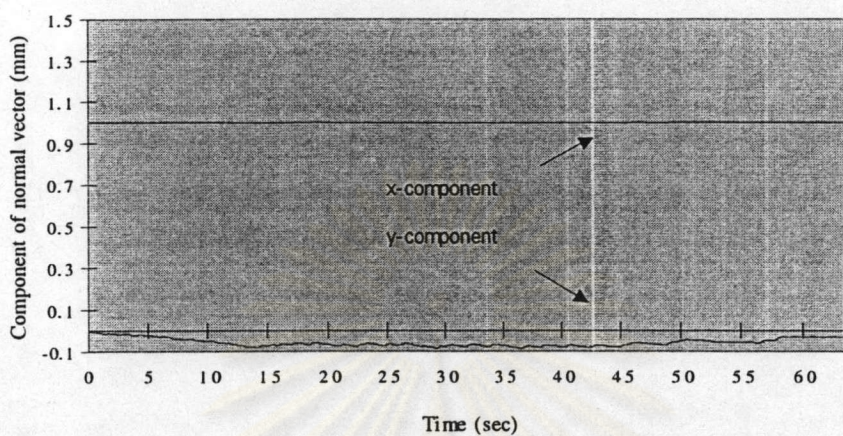
รูปที่ 4.26 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Estimation of normal vector



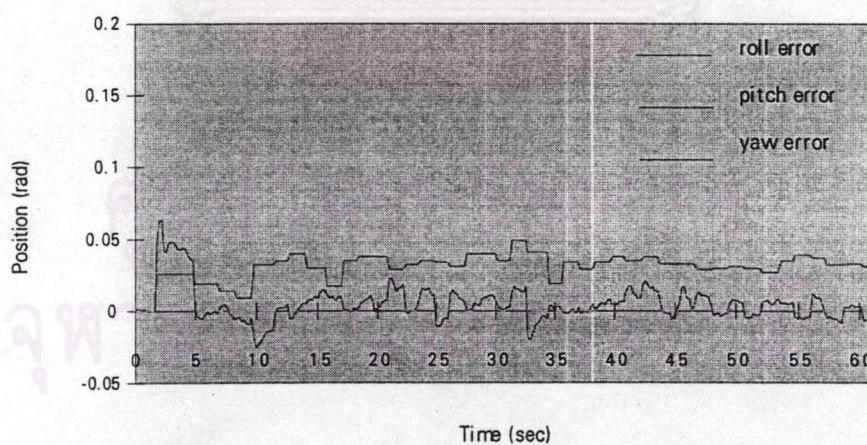
รูปที่ 4.27 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Estimation of normal vector



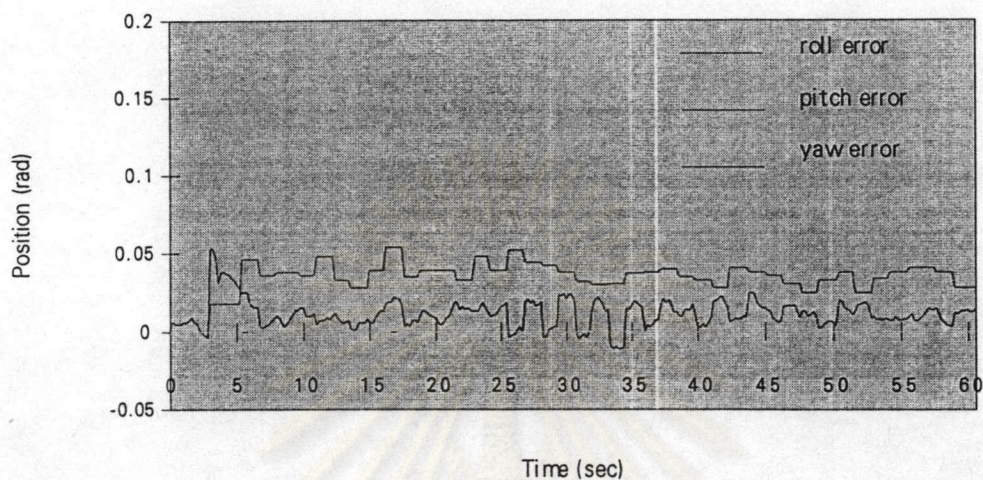
รูปที่ 4.28 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Orientation error



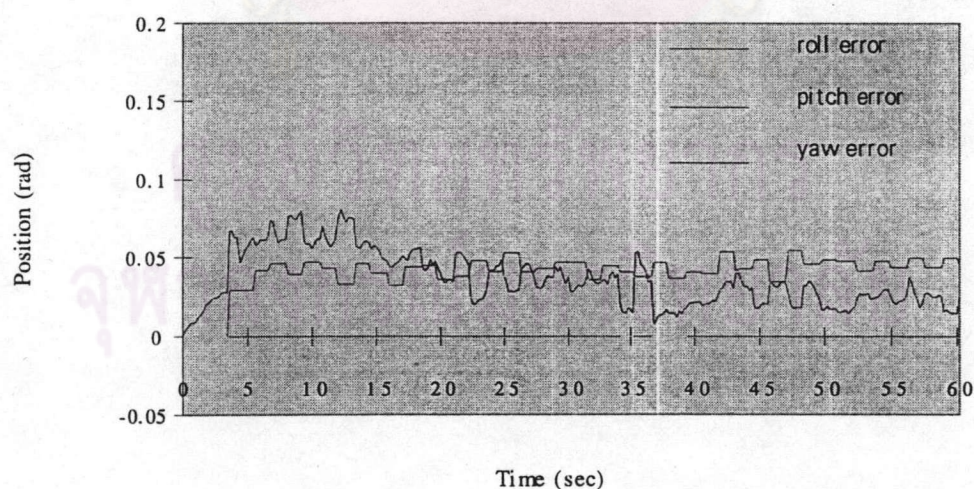
รูปที่ 4.29 แสดงค่า ผิดพลาดของ orientation ของปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Orientation error



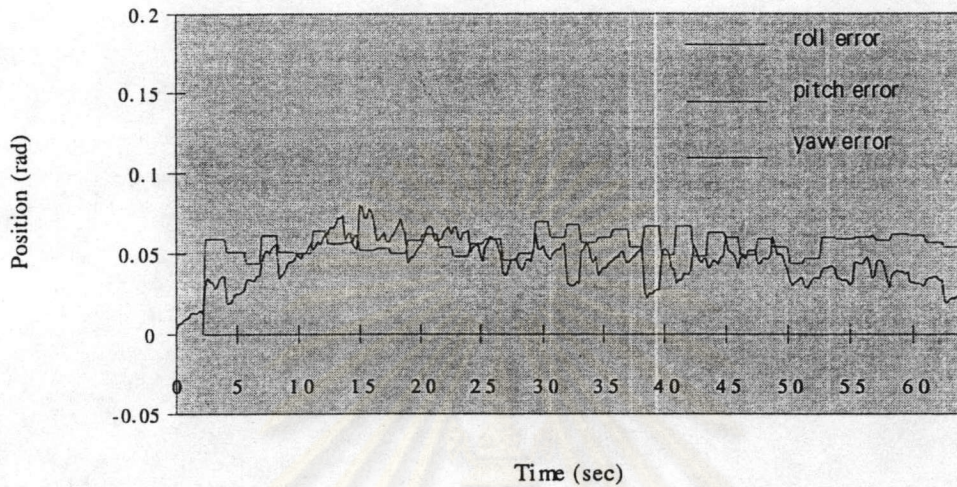
รูปที่ 4.30 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Orientation error

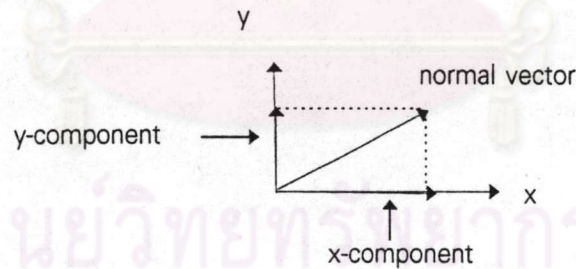


รูปที่ 4.31 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Orientation error



รูปที่ 4.32 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N



รูปที่ 4.33 แสดง x-component และ y-component ของ normal vector

จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.20 ให้แขนกลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานที่เป็นผิวแบนเรียบ โดยมีขนาดคำสั่งของแรงสูงสุด 15 N และ 30 N จากรูปจะเห็นได้ว่าแขนกลมีแนวโน้ม Track คำสั่งของแรงได้ แต่ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นจะไม่ค่อยเรียบ ค่าความผิดพลาดของแรงค่อนข้างกว้างไปมา บนเส้นคำสั่งของแรง โดยเฉพาะช่วงคำสั่งของแรงที่มีความเร่งและความหน่วง ส่วนช่วงคำสั่งของ

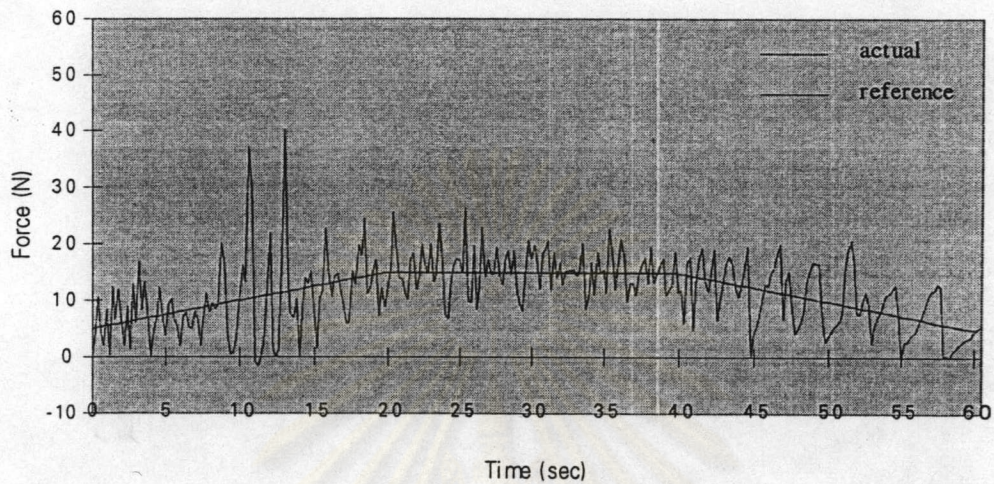
แรงที่มีค่าคงที่ แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลจะแกว่งน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมแรงที่ปลายแขนกลขณะมีการเคลื่อนที่ผลของ backlash จะมีมากขึ้น

จากรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 ขณะควบคุมแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกล ก็จะควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ไปด้วย โดยให้แขนกลเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 70 mm(ความเร็วสูงสุด 1.75 mm/sec, ความเร่ง 0.0875 mm/sec²) และ 110 mm(ความเร็วสูงสุด 2.75 mm/sec, ความเร่ง 0.1375 mm/sec²) สัมผัสกับผิวชิ้นงานตลอดเวลาไปในทิศทาง tangent vector จะเห็นได้ว่าแนวทางเดินจริงของแขนกลค่อนข้างเรียบและระยะทางเคลื่อนที่ของกรณีเกิดแรงสูงสุด 15 N จะเกิดค่าความผิดพลาดน้อยกว่ากรณีเกิดแรงสูงสุด 30 N ที่ระยะทางเคลื่อนที่เท่ากัน เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า

รูปที่ 4.25 ถึง 4.28 และ รูปที่ 4.33 ขณะเกิดแรงขึ้นที่ปลายแขนกล Force Sensor สามารถวัดขนาดของแรง ในแนวแกน X , Y และ Z ได้ และสามารถนำข้อมูลของแรงนี้มาคำนวณหาทิศทางของ normal vector ได้ผลดังกราฟ โดยทิศทางของ normal vector จะหาจาก component ของ normal vector ในแนวแกน X และ Y ส่วนทิศทางของ tangent vector นั้นจะตั้งฉากกับทิศทางของ normal vector ตลอดเวลา จากรูปจะเห็นได้ว่า component ของ normal vector ในแนวแกน X จะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 1.0 ส่วน component ของ normal vector ในแนวแกน Y ก็มีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณศูนย์ แสดงว่าทิศทางของ normal vector นั้นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายถึงผิวชิ้นงานที่ปลายแขนกลสัมผัสอยู่นั้นมีลักษณะเป็นผิวแบนเรียบ

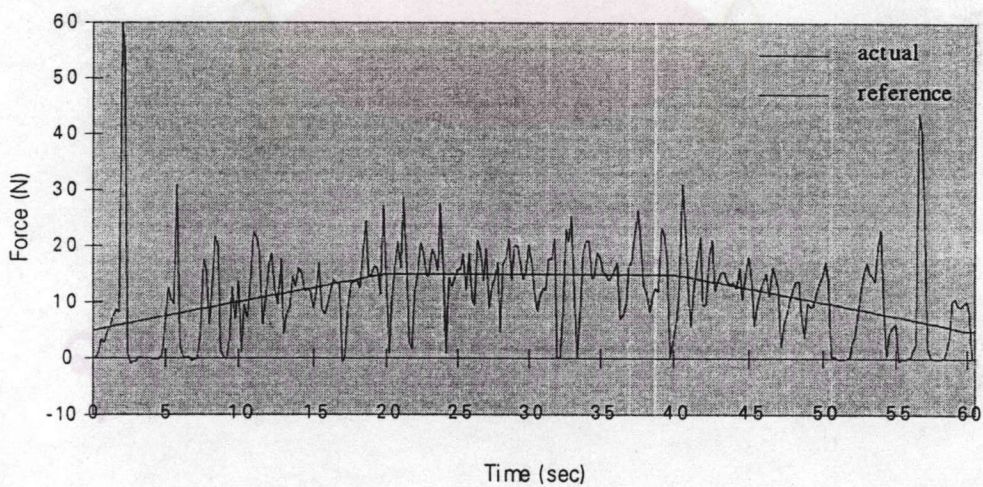
จากรูปที่ 4.29 ถึง 4.32 เมื่อหาทิศทางของ normal vector และ tangent vector ได้แล้ว แขนกลก็จะพยายามปรับ Orientation ของปลายแขนกลตามทิศทางของ normal vector และ tangent vector โดยเกิดค่าความผิดพลาดของ Orientation ดังกราฟ จากรูปค่าความผิดพลาดของมุม pitch จะเป็นศูนย์ เนื่องจากแขนกลที่ใช้ในการทดลองมี 5 ข้อต่อจึงปรับ Orientation ได้เฉพาะมุม roll และมุม yaw ส่วนค่าความผิดพลาดของมุม roll และมุม yaw จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 0.08 rad

Force response



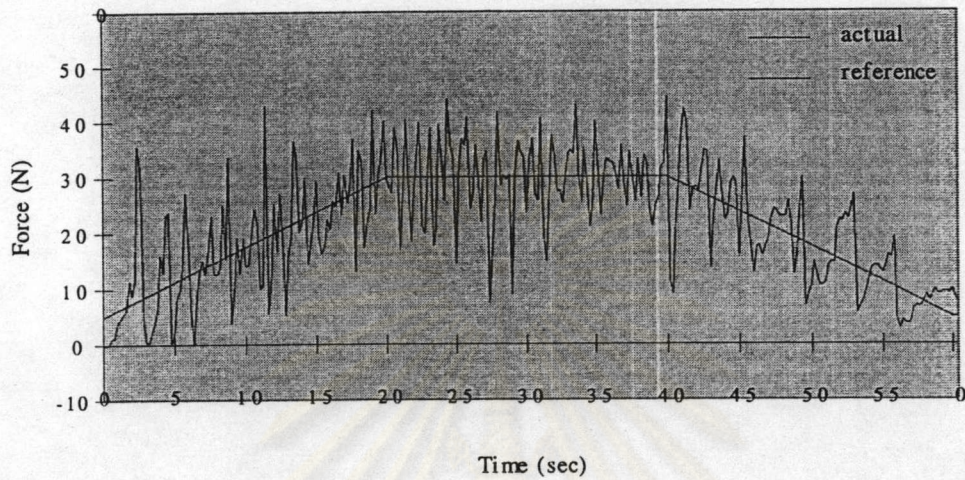
รูปที่ 4.34 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N
ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก

Force response



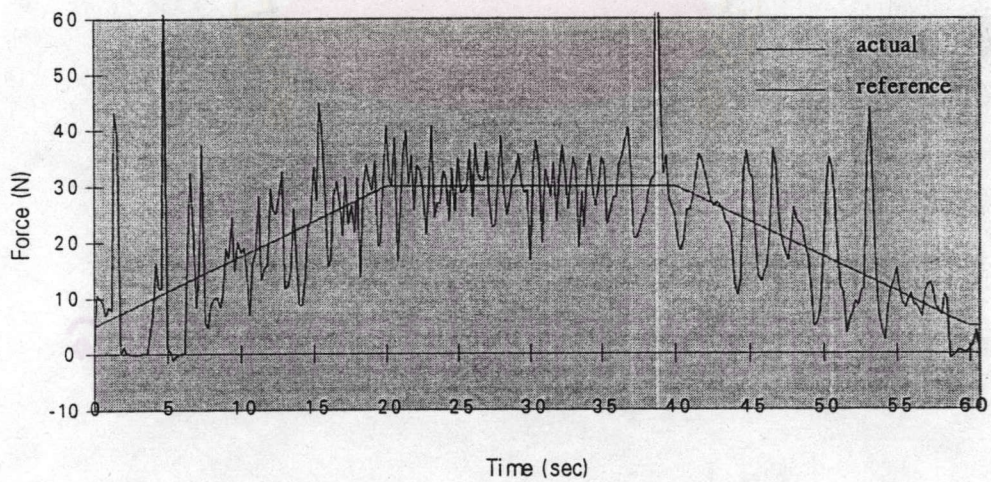
รูปที่ 4.35 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N
ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก

Force response



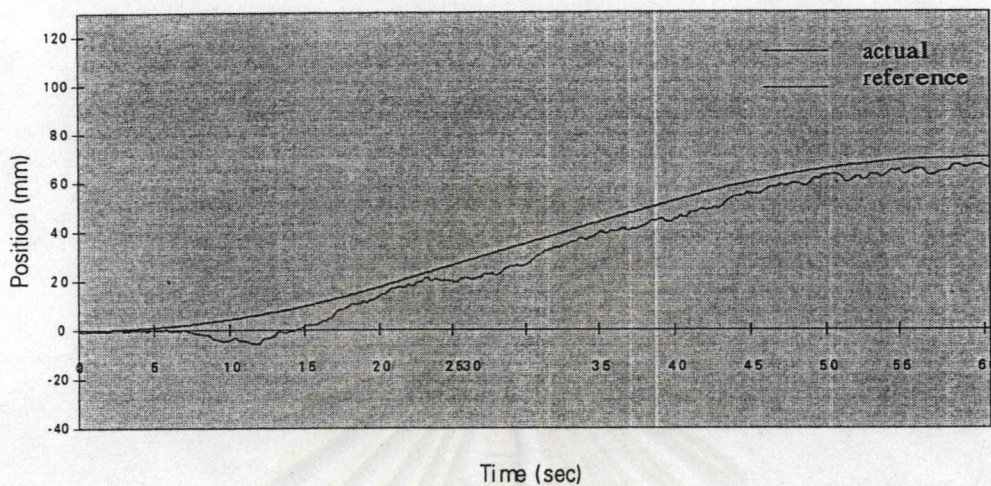
รูปที่ 4.36 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก

Force response



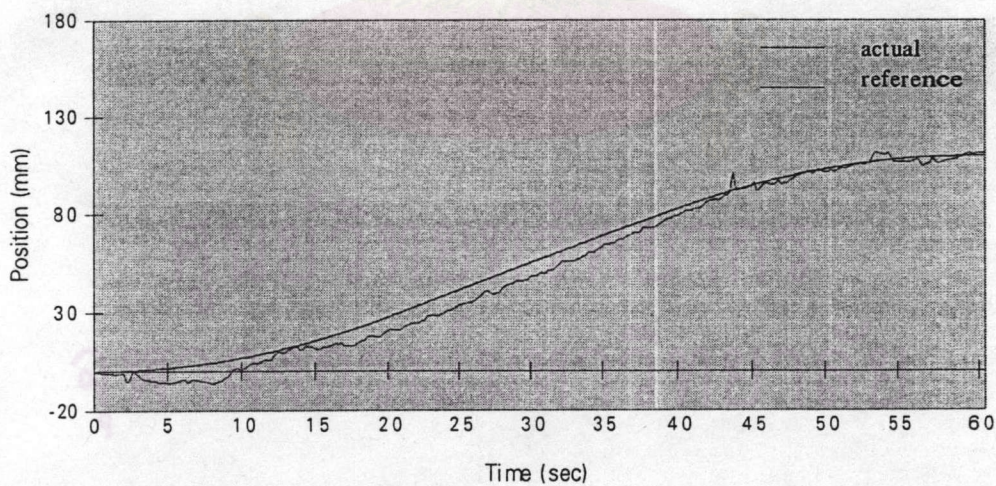
รูปที่ 4.37 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก

Position response



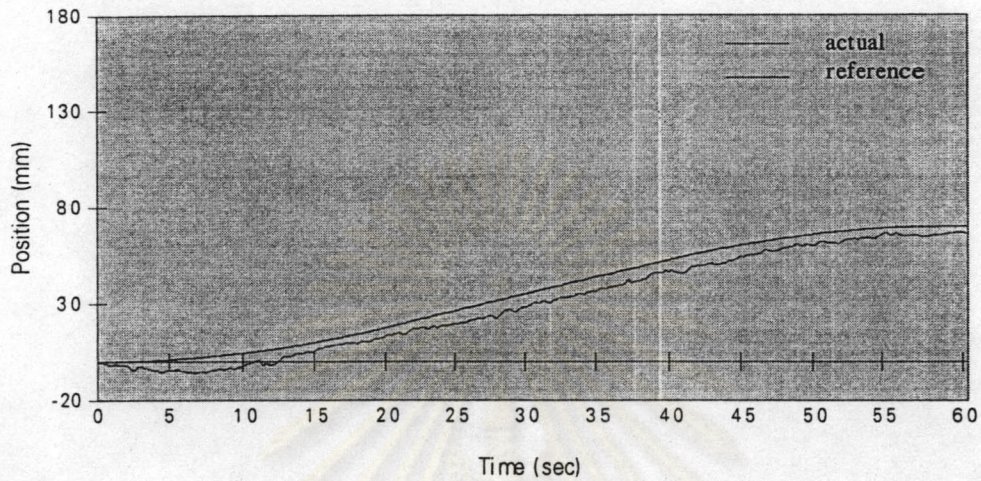
รูปที่ 4.38 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก
ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Position response



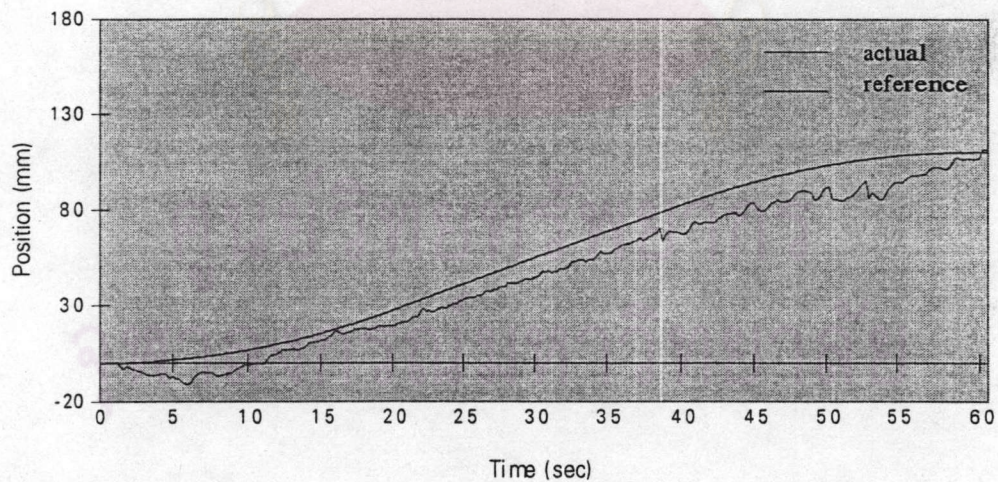
รูปที่ 4.39 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก
ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Position response



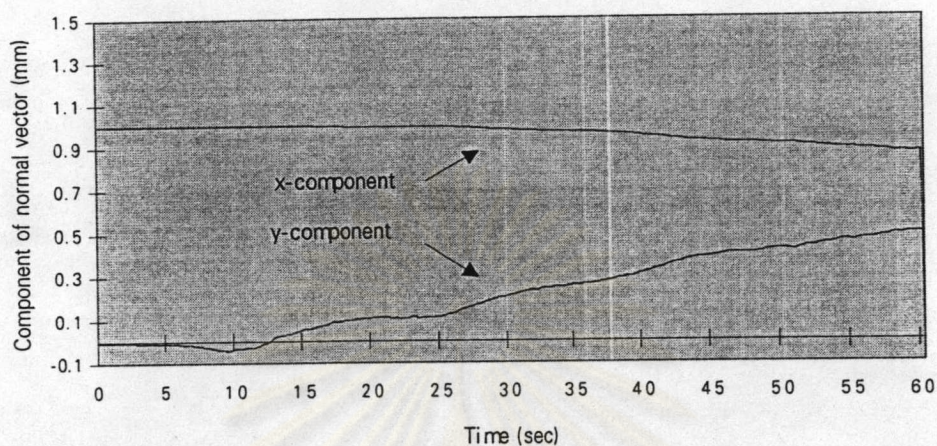
รูปที่ 4.40 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Position response



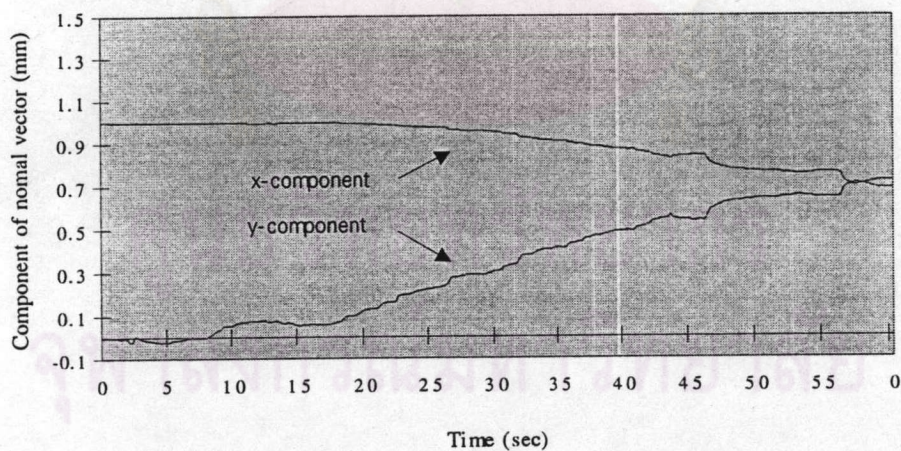
รูปที่ 4.41 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Estimation of normal vector



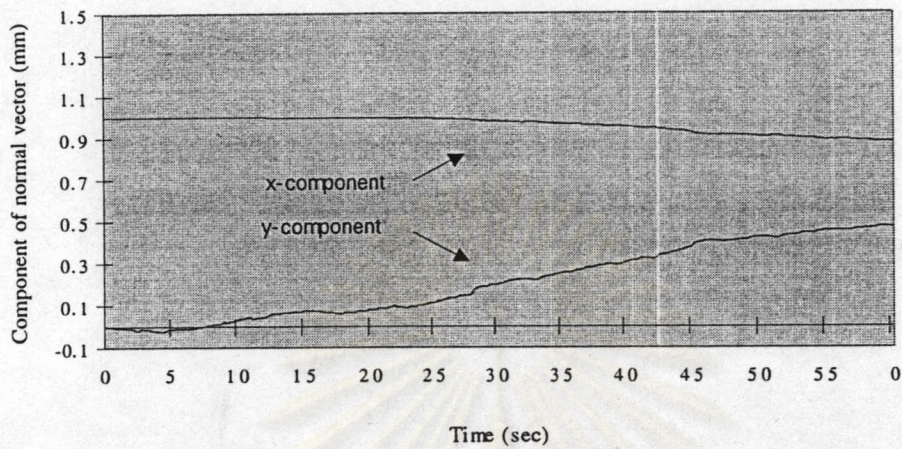
รูปที่ 4.42 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Estimation of normal vector



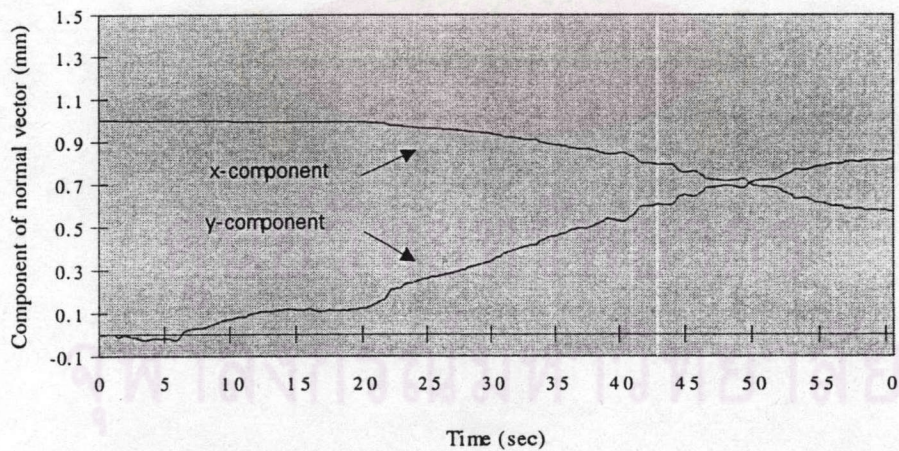
รูปที่ 4.43 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Estimation of normal vector



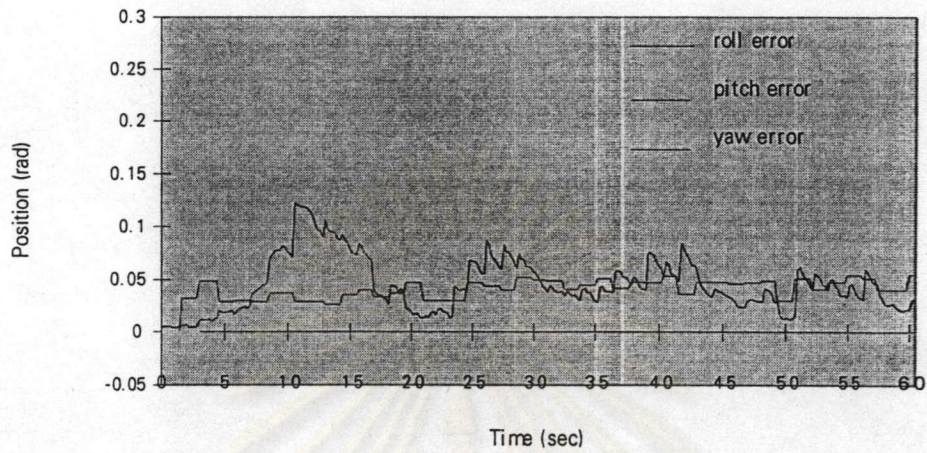
รูปที่ 4.44 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Estimation of normal vector



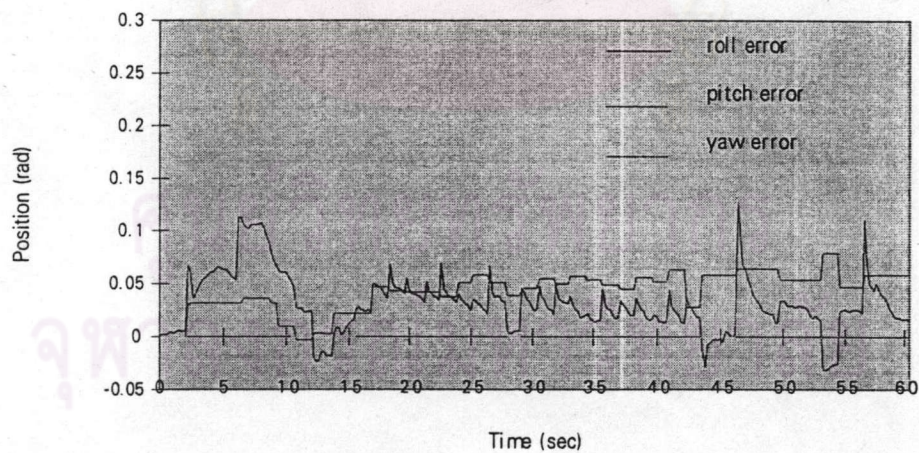
รูปที่ 4.45 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Orientation error



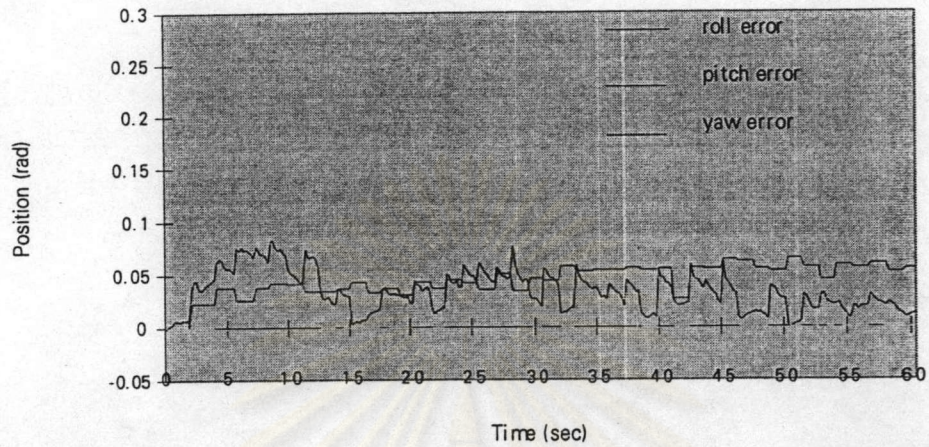
รูปที่ 4.46 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วย ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Orientation error



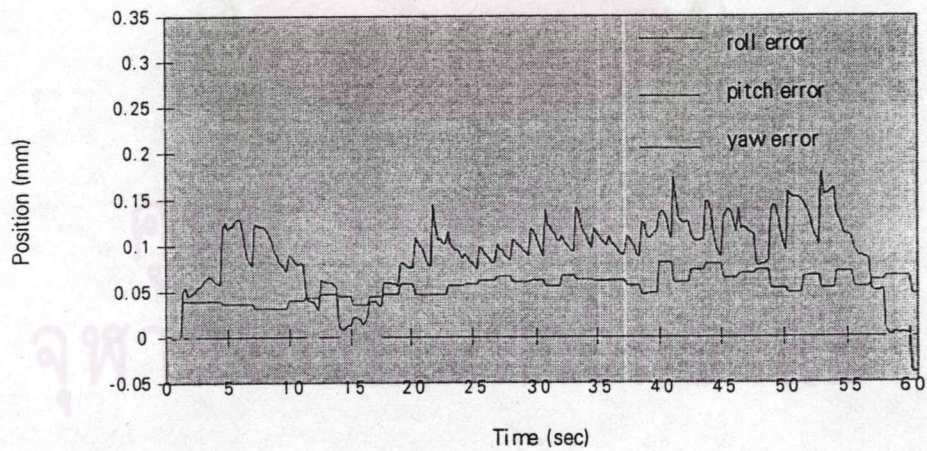
รูปที่ 4.47 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วย ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Orientation error



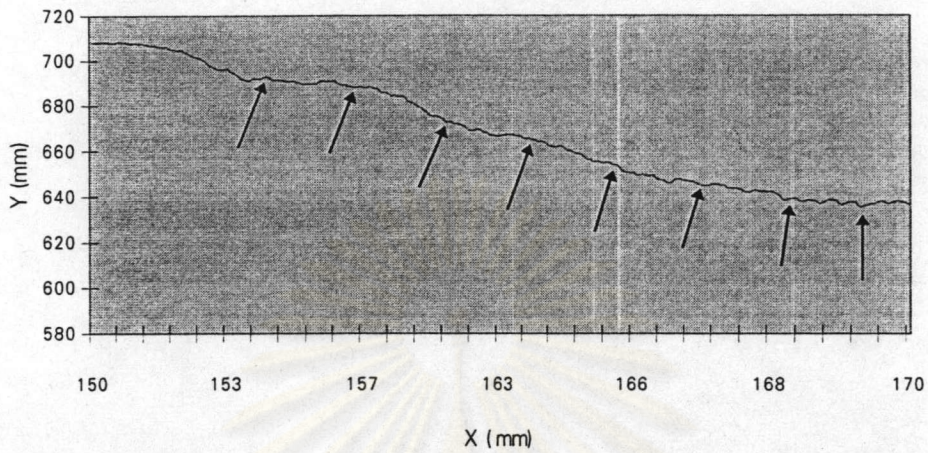
รูปที่ 4.48 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วย ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Orientation error



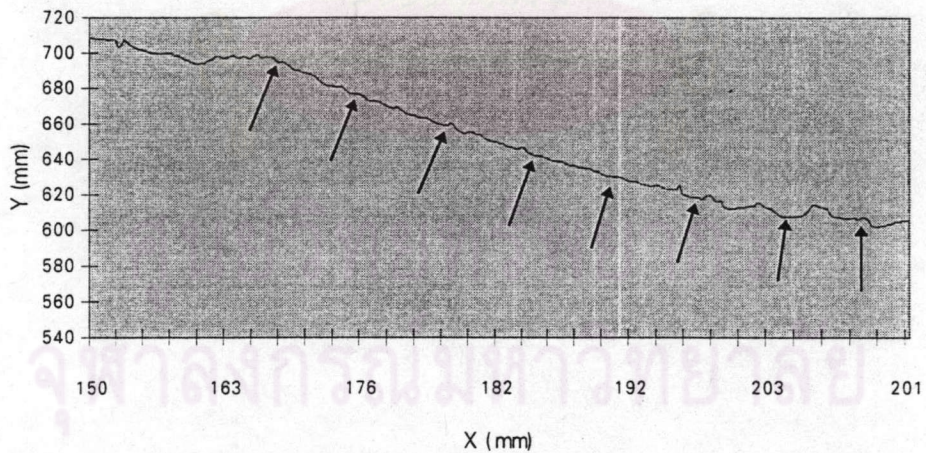
รูปที่ 4.49 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วย ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Unknown constraint surface



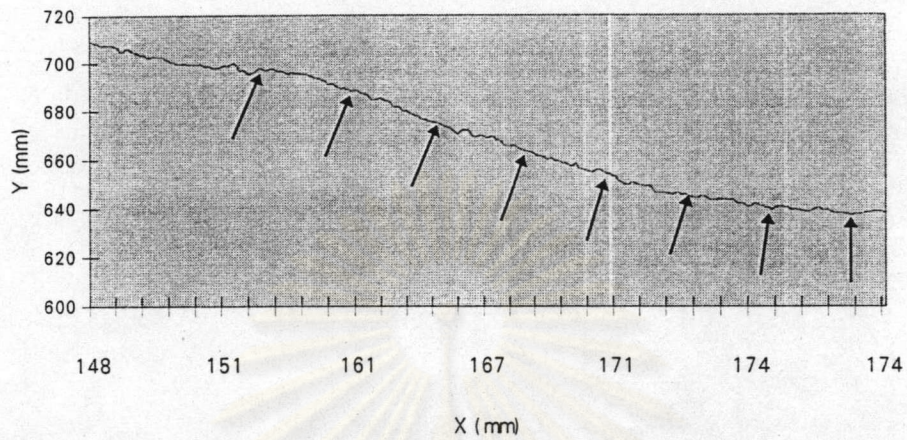
รูปที่ 4.50 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแกนเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Unknown constraint surface



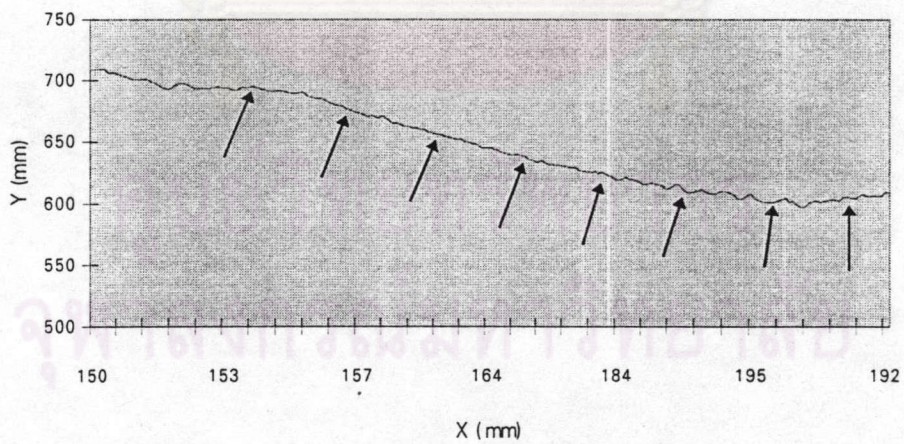
รูปที่ 4.51 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแกนเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N

Unknown constraint surface



รูปที่ 4.52 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแกนกลเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

Unknown constraint surface



รูปที่ 4.53 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแกนกลเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้งทรงกระบอก และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N

จากรูปที่ 4.34 ถึง 4.37 ให้แกนกลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานที่เป็นผิวโค้งทรงกระบอก โดยมีขนาดคำสั่งของแรงสูงสุด 15 N และ 30 N จากรูปจะเห็นได้ว่าแกนกลมีแนวโน้ม Track คำสั่งของแรงได้ เช่นเดียวกันกับกรณีแกนกลเคลื่อนที่บนชิ้นงานผิวแบนเรียบ และลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นก็จะคล้ายกันคือ ค่าความผิดพลาดของแรงค่อนข้างกว้างไปมาบนเส้นคำสั่งของแรง โดยเฉพาะช่วงคำสั่งของแรงที่มีความเร่งและความหน่วง ส่วนช่วงคำสั่งของแรงที่มีค่าคงที่แรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแกนกลจะแกว่งน้อยลง

จากรูปที่ 4.38 ถึง 4.41 ขณะควบคุมแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแกนกลก็จะควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ไปด้วย โดยให้แกนกลเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 70 mm (ความเร็วสูงสุด 1.75 mm/sec, ความเร่ง 0.0875 mm/sec²) และ 110 mm (ความเร็วสูงสุด 2.75 mm/sec, ความเร่ง 0.1375 mm/sec²) สัมผัสกับผิวชิ้นงานตลอดเวลาไปในทิศทาง tangent vector จะเห็นได้ว่าแนวทางเดินจริงของแกนกลค่อนข้างเรียบ และการเคลื่อนที่ของกรณีเกิดแรงสูงสุด 15 N จะเกิดค่าความผิดพลาดน้อยกว่ากรณีเกิดแรงสูงสุด 30 N ที่ระยะทางเคลื่อนที่เท่ากัน เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า

รูปที่ 4.42 ถึง 4.45 ขณะเกิดแรงขึ้นที่ปลายแกนกล Force Sensor สามารถวัดขนาดของแรง ในแนวแกน X, Y และ Z ได้ และสามารถนำข้อมูลของแรงนี้มาคำนวณหาทิศทางของ normal vector ได้ผลดังกราฟ โดยทิศทางของ normal vector จะหาจาก component ของ normal vector ในแนวแกน X และ Y ส่วนทิศทางของ tangent vector นั้น จะตั้งฉากกับทิศทางของ normal vector ตลอดเวลา จากรูปจะเห็นได้ว่า component ของ normal vector ในแนวแกน X จะมีค่าเริ่มต้นเป็น 1.0 และจะมีค่าค่อย ๆ ลดลง ส่วน component ของ normal vector ในแนวแกน Y ก็มีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ และจะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แสดงว่าทิศทางของ normal vector นั้นมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.46 ถึง 4.49 เมื่อหาทิศทางของ normal vector และ tangent vector ได้แล้ว แกนกลก็จะพยายามปรับ Orientation ของปลายแกนกลตามทิศทางของ normal vector และ tangent vector โดยเกิดค่าความผิดพลาดของ Orientation ดังกราฟ จากรูปค่าความผิดพลาดของมุม roll และมุม yaw จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 0.15 rad ซึ่งจะมากกว่าค่าผิดพลาดของกรณีเคลื่อนที่บนผิวแบนเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่บนผิวโค้ง normal vector ของผิวชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

จากรูปที่ 4.50 ถึง 4.53 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแกนกลเคลื่อนที่สัมผัสซึ่งได้จากการวัดตำแหน่งใน cartesian coordinate ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของผิวชิ้นงานจะเป็นผิวโค้งสอดคล้องกับ normal vector ที่หาได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย