

## บทที่ 4

### การทดสอบการควบคุมตำแหน่งและแรงของแขนกล

#### 4.1 รูปแบบและอุปกรณ์ควบคุมแขนกล

แขนกลที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4 มีรูปแบบดังที่ได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 2 ส่วนข้อต่อขับทั้งสี่ใช้บอลสกรูเพื่อเปลี่ยนการหมุนให้เป็นการเคลื่อนที่แนวตรง บอลสกรูที่ใช้มีระยะเกลียว 5 มิลลิเมตร มอเตอร์บริษัทเลขที่ใช้มีกำลัง 1 กิโลวัตต์ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความยาวของบอลสกรู เนื่องจากช่วงกลางของบอลสกรูระหว่างลูกปืนหัวท้ายยาวประมาณ 1.2 เมตร ความเร็วที่ปลอดภัยจากคำแนะนำของผู้ผลิตมีค่าประมาณ 3000 รอบต่อนาที จากความเร็วนี้ทำให้แขนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ

$$V_{\max} = \frac{5(3000)}{1000} = 15 \text{ m/min.}$$

ความเร็วสูงสุดนี้เป็นความเร็วในแกน x ความเร็วในแกน z มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความเร็วในแกน x

ตัวควบคุมที่ใช้คือ dSpace 1103 ความเร็วตัวประมวลผล 400 MHz การทำงานของโปรแกรมควบคุมแบ่งเป็นสามระดับคือ

1. ระดับคำสั่ง จะทำหน้าที่คำนวณตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป รอบคำสั่งนี้จะคำนวณคำสั่งใหม่ทุกๆ 10 มิลลิวินาที
2. ระดับควบคุมหรือระดับเซอร์โว จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับข้อต่อขับทั้งสี่ ตัวควบคุมจะรับตำแหน่งของข้อต่อขับจากเอนโคเดอร์ผ่านกฎการควบคุมแบบพีไอดี จากนั้นจึงคำนวณสัญญาณควบคุมใหม่ส่งไปยังตัวขยายเพื่อควบคุมมอเตอร์ การทำงานของระดับควบคุมมีอัตรา 1 มิลลิวินาที
3. ระดับตรวจรู้แรง จะทำหน้าที่อ่านสัญญาณจากตัวตรวจรู้แรง แล้วนำสัญญาณที่ได้มาผ่านตัวกรองผ่านต่ำ ซึ่งตัวกรองผ่านต่ำที่ใช้เป็นแบบซอฟต์แวร์ การทำงานในระดับนี้มีอัตราสุ่มตัวอย่าง 50 ไมโครวินาที

ตัวตรวจรู้แรงที่ใช้คือ ATI mini45 สามารถรับรู้แรงและโมเมนต์รวมหกแกน

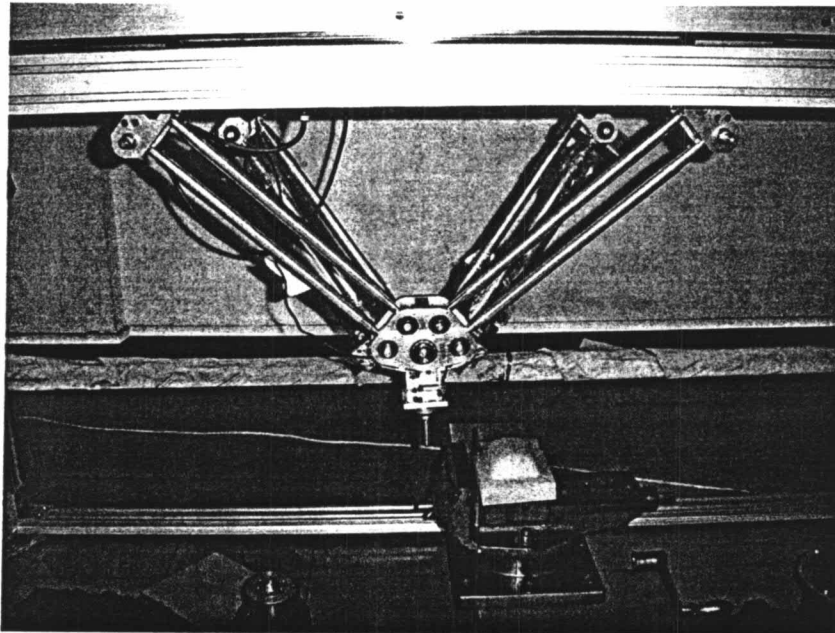
ค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์มีดังนี้

$$c = d = 0.02$$

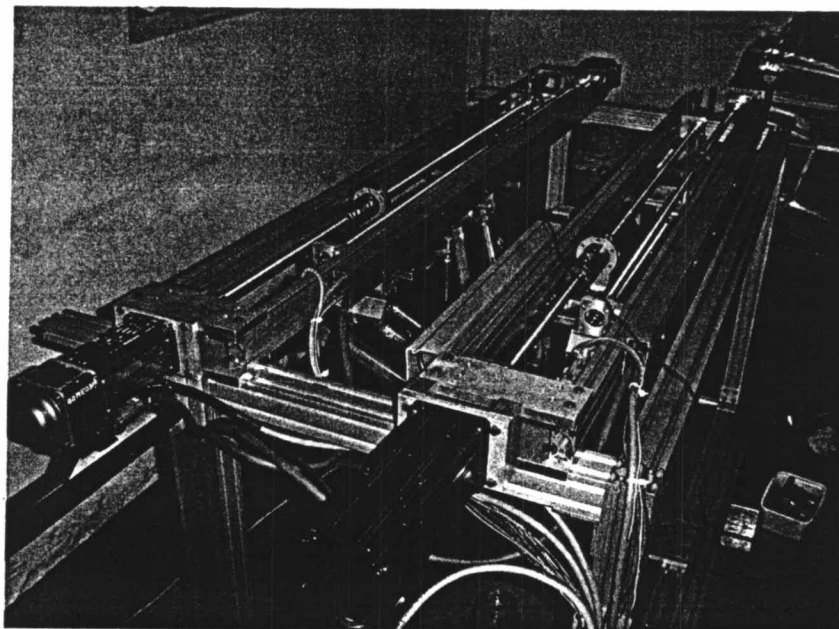
$$(a - b) = 0.143$$

$$R = 0.4$$

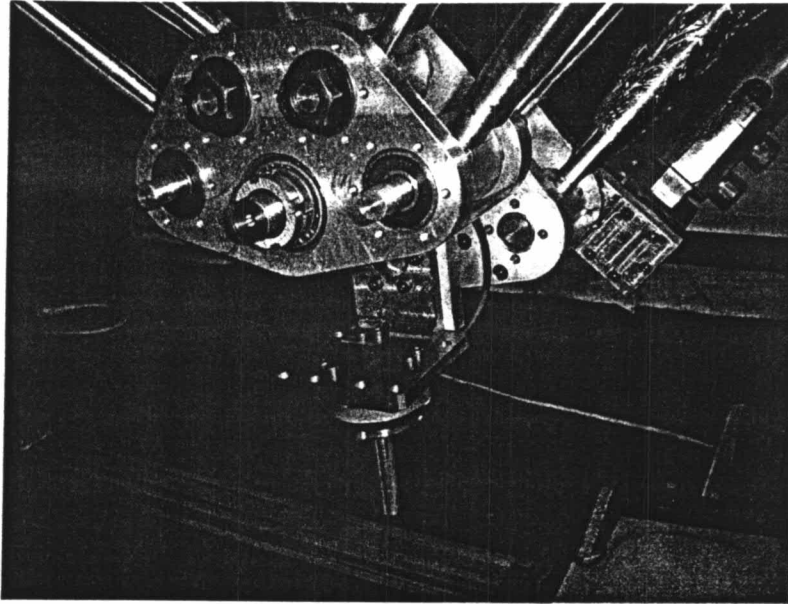
ค่า  $c$   $d$  และความยาวของขา  $R$  ได้จากแบบ และค่า  $(a-b)$  ได้จากแบบและปรับเปลี่ยนตามการทดลอง



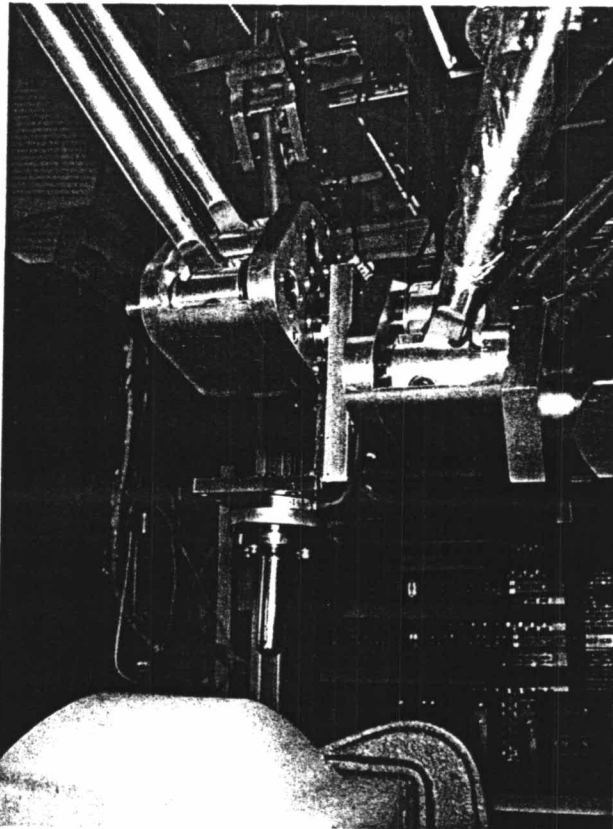
รูปที่ 4.1 แขนกลแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.2 การวางตัวของข้อต่อขับทั้งสี่ของแขนกลแบบขนานที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 รายละเอียดบริเวณ Platform ของแขนกลแบบขนานที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.4 รายละเอียดบริเวณ Platform ของแขนกลแบบขนานและตัวตรวจรู้แรงที่ใช้

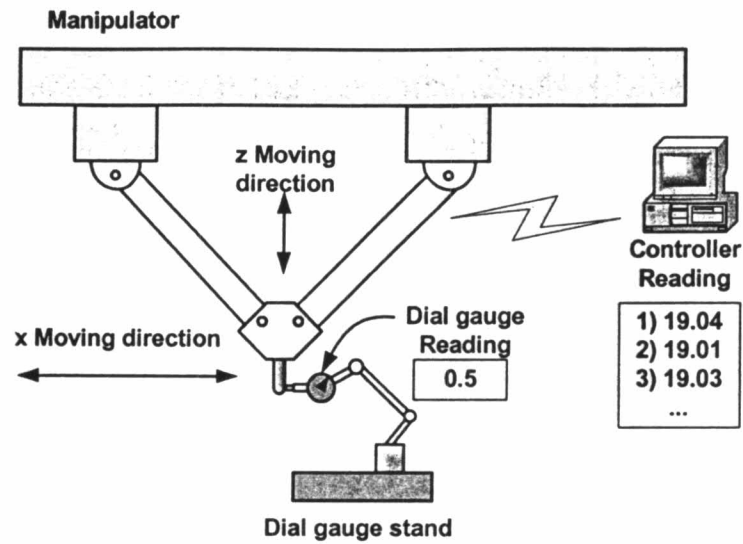
#### 4.2 การทดสอบแขนกลที่สร้างขึ้น

การทดสอบแขนกลจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ

1. การทดสอบความแม่นยำและความสามารถในการทำงานซ้ำ (Repeatability) ของแขนกล กระทำโดยใช้ Dial gauge เพื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่หลังจากนั้นเคลื่อนแขนกลออกจากจุดเริ่มไปจนสุดพื้นที่ทำงานของแขนกล แล้วเคลื่อนที่กลับมาแตะกับเข็มของ dial gauge ให้ได้ตำแหน่ง dial gauge เดิม เปรียบเทียบตำแหน่งของแขนกลที่ได้จากตัวควบคุมทั้งก่อนและหลังการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากการวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ในพื้นที่ทำงานทำได้ยาก นอกจากจะมีอุปกรณ์สอบเทียบที่แม่นยำ ประกอบกับการทดสอบการควบคุมตำแหน่งในงานวิจัยนี้ไม่ใช่ประเด็นหลัก ดังนั้นการทดสอบนี้จึงกระทำเพียงการทดสอบความสามารถในการทำซ้ำในบริเวณต่างๆของพื้นที่ทำงานเท่านั้น
2. การทดสอบการควบคุมแรงกดต่อวัตถุเวดล้อมของแขนกลโดยใช้ตัวควบคุมตำแหน่งและแรงที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จะทำการทดสอบในลักษณะต่างๆกัน ได้แก่
  - a. การควบคุมแรงกดขนาดต่างๆบนวัตถุที่มีความแข็งเกร็งสูง ที่ความเร็วต่างๆ โดยมุมเอียง Platform เป็น 0 องศา
  - b. การควบคุมแรงกดขนาดต่างๆบนวัตถุที่มีความแข็งเกร็งสูง ที่ความเร็วต่างๆ โดยแปรเปลี่ยนมุมเอียง Platform ให้ตั้งฉากกับพื้นผิว
  - c. การควบคุมแรงกดขนาดต่างๆบนวัตถุที่มีความแข็งเกร็งสูง และมีพื้นผิวไม่ต่อเนื่อง
  - d. การควบคุมแรงกดขนาดต่างๆบนวัตถุที่มีความหยุ่นตัวสูงเช่น โฟม

#### 4.2.1 การทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของแขนกล

การทดสอบจะกระทำดังรูปที่ 4.5 ในทิศทาง  $x y z$  และ  $\theta$  ทั้งทิศทางบวกและลบ แขนกลจะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็วสูงและเคลื่อนกลับตำแหน่งเดิม เมื่อใกล้จะถึงตำแหน่งเดิม จะควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่อย่างละเอียดทีละ 0.01 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.5 การทดสอบความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งแกนกลโดยใช้ Dial gauge

ตาราง 4.1 การทดสอบ Repeatability ในแกน +x +y และ +z

		z=-275.05			y = 19.49	
	x (mm)	dial	y (mm)	dial	z (mm)	dial
1	-1.23	0.5	28.99	0.5	-347.04	0.5
2	-1.29	0.5	28.99	0.5	-347.05	0.5
3	-1.27	0.5	29.00	0.5	-347.05	0.5
4	-1.27	0.5	29.02	0.5	-347.04	0.5
5	-1.26	0.5	28.91	0.5	-347.04	0.5
6	-1.27	0.5	28.99	0.5	-347.05	0.5
7	-1.26	0.5	29.04	0.5	-347.05	0.5
8	-1.25	0.5	29.00	0.5	-347.04	0.5
9	-1.24	0.5	29.01	0.5	-347.06	0.5
10	-1.25	0.5	29.00	0.5	-347.06	0.5

ตาราง 4.2 การทดสอบ Repeatability ในแกน -y และ -z

		z=-350.57		y=19.49	
	y (mm)	dial	z (mm)	dial	
1	-31.40	0.5	-274.31	0.5	

ตาราง 4.2 (ต่อ)				
2	-31.40	0.5	-274.31	0.5
3	-31.42	0.5	-274.3	0.5
4	-31.42	0.5	-274.29	0.5
5	-31.42	0.5	-274.29	0.5
6	-31.41	0.5	-274.29	0.5
7	-31.42	0.5	-274.29	0.5
8	-31.41	0.5	-274.29	0.5
9	-31.40	0.5	-274.29	0.5
10	-31.45	0.5	-274.28	0.5

ตาราง 4.3 การทดสอบ Repeatability ในแกน  $+ \theta$  และ  $\pm \theta$

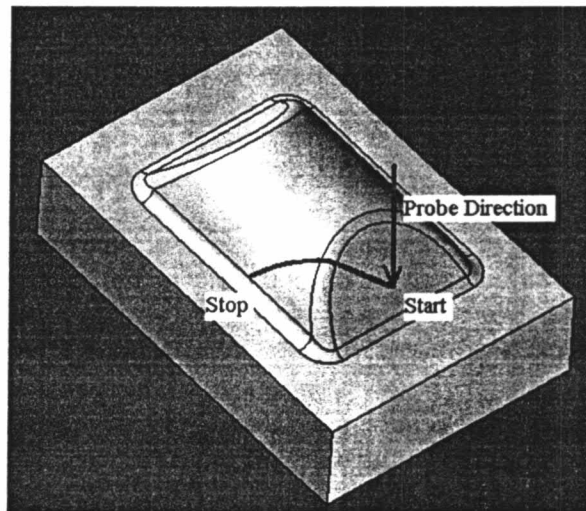
	y=0		z=-310.78	
	+A (rad)	dial	$\pm A$ (rad)	dial
1	0	0.5	-0.702	0.5
2	-0.008	0.5	-0.701	0.5
3	-0.009	0.5	-0.703	0.5
4	-0.009	0.5	-0.702	0.5
5	-0.01	0.5	-0.703	0.5
6	-0.01	0.5	-0.702	0.5
7	-0.008	0.5	-0.704	0.5
8	-0.008	0.5	-0.701	0.5
9	-0.007	0.5	-0.702	0.5
10	-0.008	0.5	-0.701	0.5

จากตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 พบว่าตัวควบคุมตำแหน่งแกนกลมีความสามารถควบคุมให้แกนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเดิมได้โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 0.1$  มิลลิเมตร และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน  $\pm 0.01$  เรเดียน หรือ 0.57 องศา

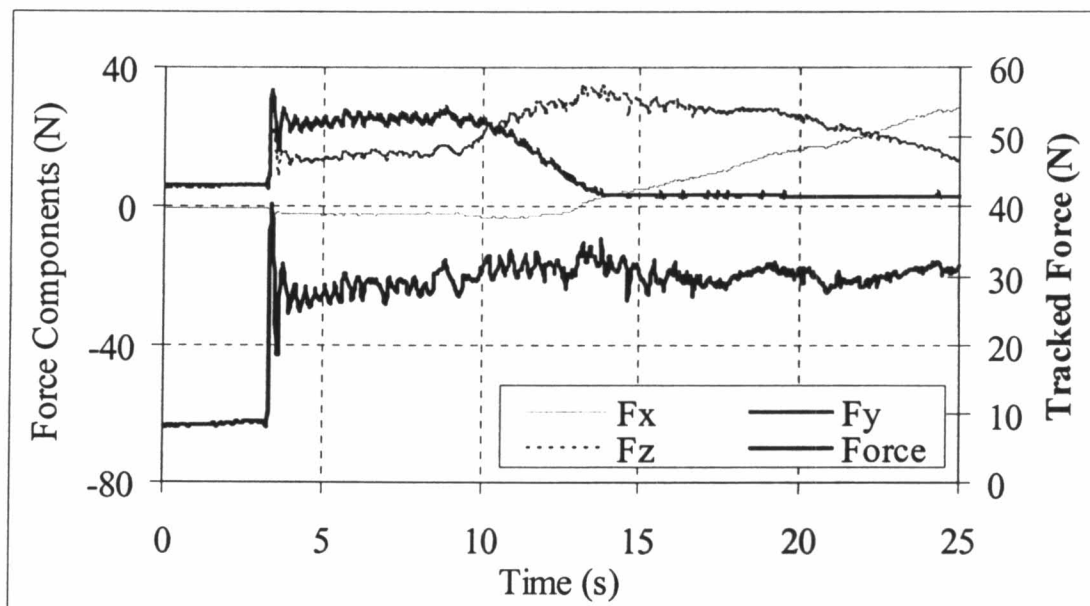
## 4.2.2 การควบคุมแรงกดต่อวัตถุเวดล้อม

### 4.2.2.1 การควบคุมแรงกดโดยมุมเอียง Platform เป็น 0 องศา

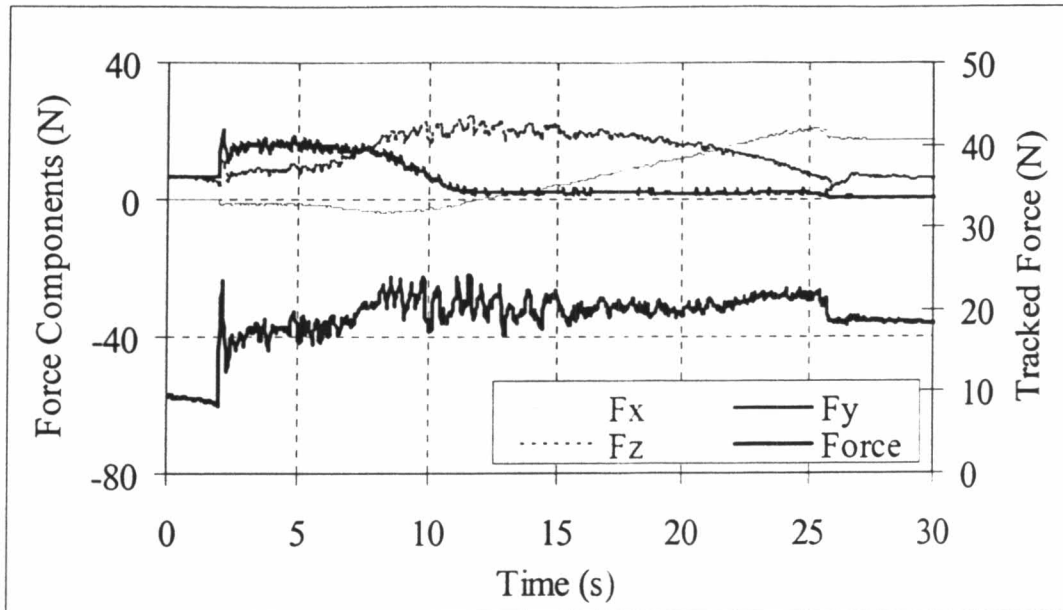
ในการทดสอบนี้ได้มีการควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความแข็งเกร็งสูง เริ่มจากเรซิน โดยควบคุมแรงกดที่ 15 ถึง 30 นิวตัน และควบคุมความเร็วตั้งแต่ 9 ถึง 21 เซนติเมตรต่อนาที ทิศทางในการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.13



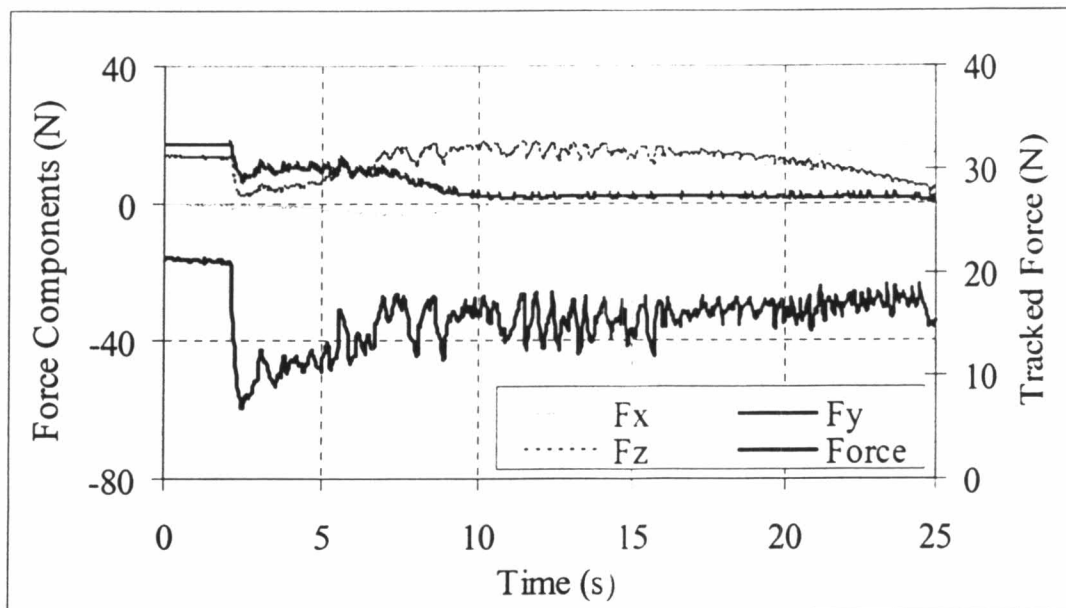
รูปที่ 4.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการทดลองควบคุมแรงกดบนเรซิน



รูปที่ 4.7 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 30 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที



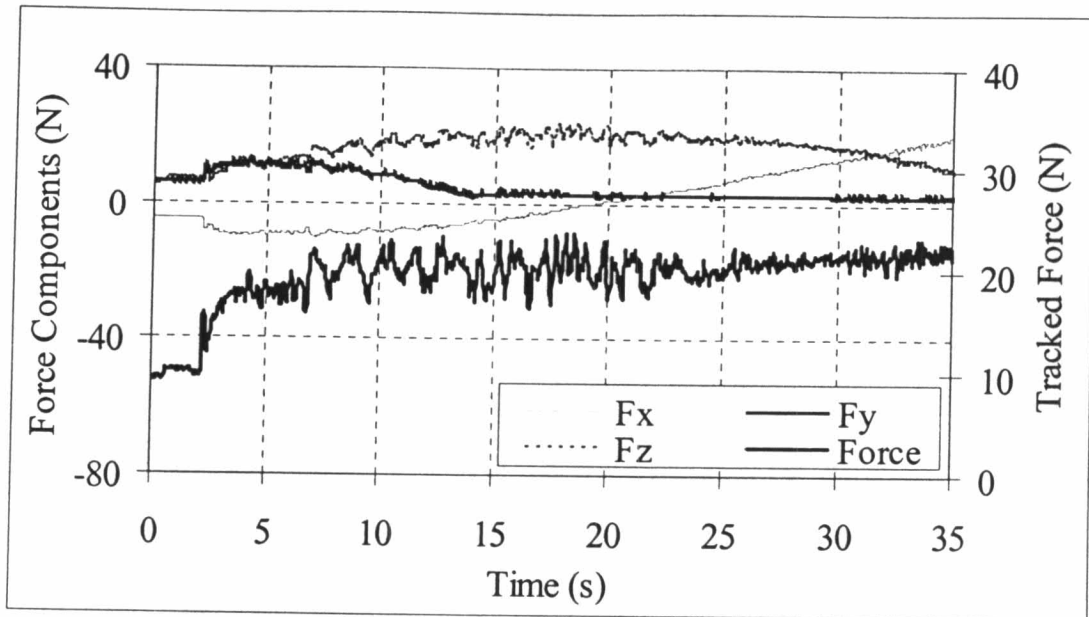
รูปที่ 4.8 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อวินาที



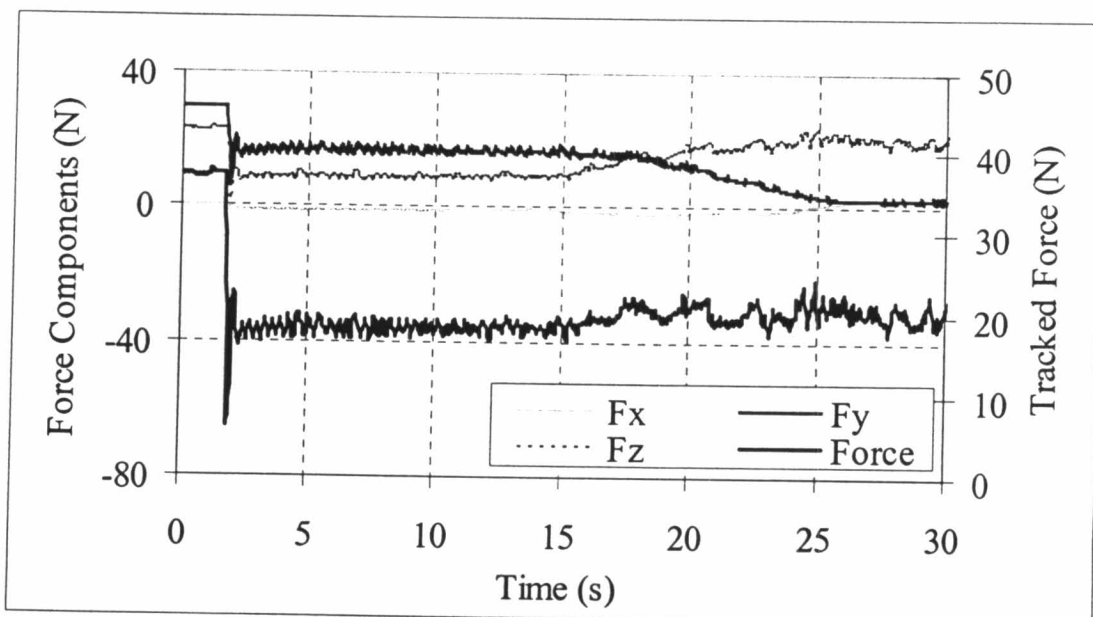
รูปที่ 4.9 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 15 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่า ส่วนประกอบของแรงในแนว  $y$  และ  $z$  จะคงที่ในช่วงแรกเนื่องจากพื้นผิวเอียงคงที่ หลังจากผ่านช่วงแรงไปทั้งแรงในแกน  $y$  และ  $z$  จะแปรเปลี่ยนไปตามพื้นผิวที่มีลักษณะโค้ง



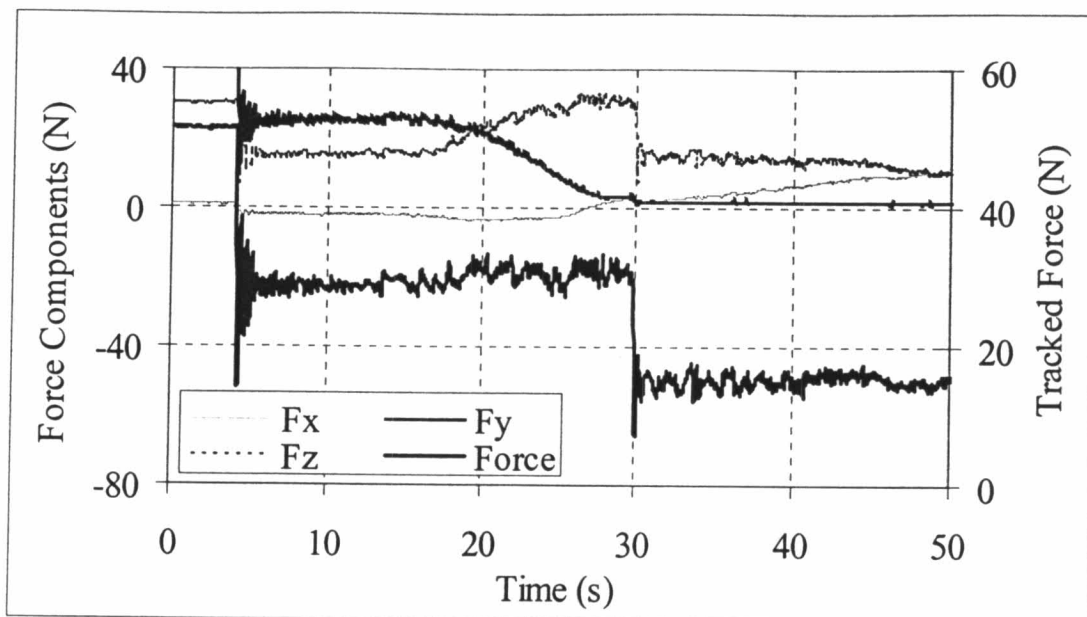


รูปที่ 4.10 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที

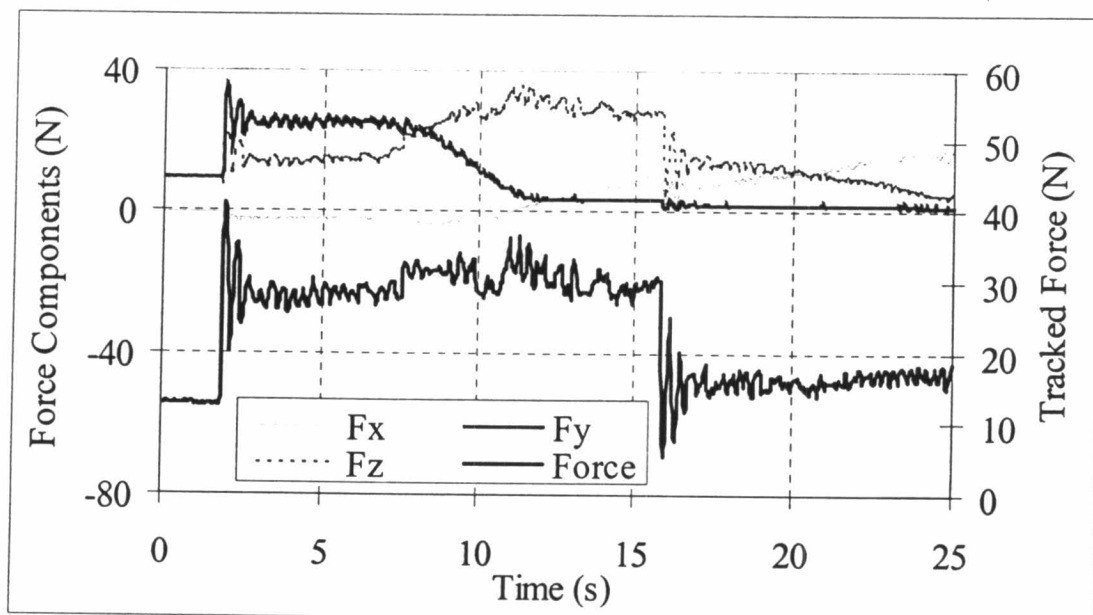


รูปที่ 4.11 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 พบว่าผลตอบสนองของแรงกดมีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตันและมีโอเวอร์ชูตประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ แรงจะเข้าที่ภายในเวลา 2 ถึง 3 วินาที นอกจากนี้ยังพบว่า การควบคุมแรงกดที่มากจะได้ผลดีกว่าแรงกดที่น้อย และเช่นเดียวกัน การควบคุมแรงกดที่ความเร็วช้าจะได้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าที่ความเร็วสูง



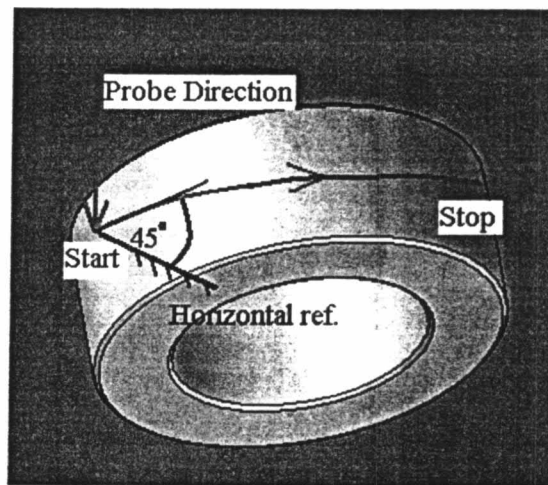
รูปที่ 4.12 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซิน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N  
ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อวินาที



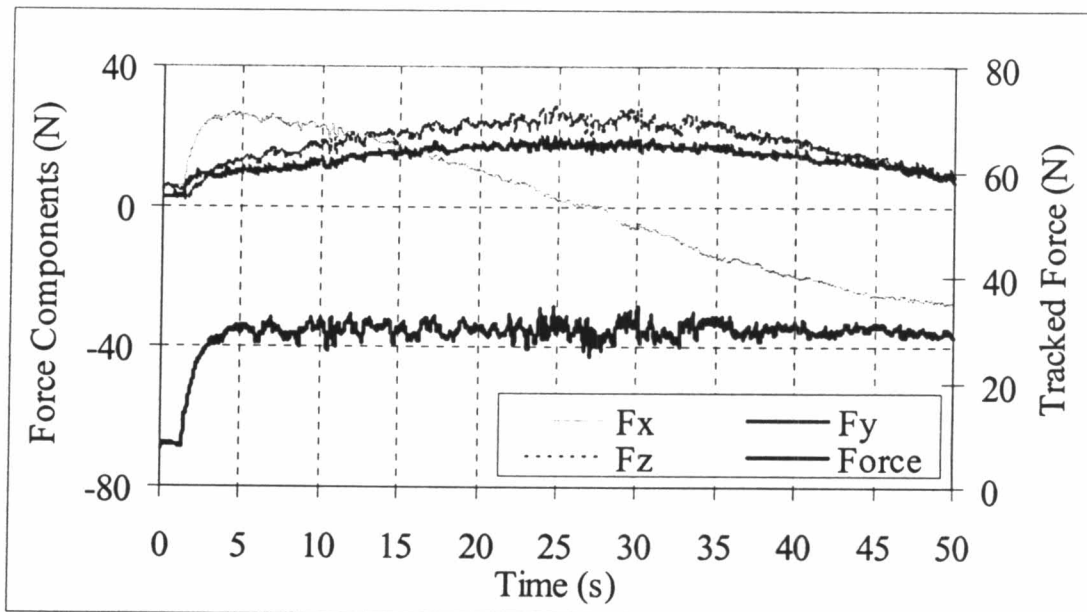
รูปที่ 4.13 การทดลองควบคุมแรงกดบนเรซิน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N  
ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตัวควบคุมตอบสนองต่อคำสั่งแรงที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดได้ดี โดยมีโอเวอร์ชูตประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์และเวลาเข้าที่ประมาณ 2 ถึง 3 วินาที นอกจากนี้ยังมีความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน

ต่อไปในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 เป็นการควบคุมแรงกดบนเหล็กโดยมีทิศทาง การเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.14 ควบคุมแรงกดที่ 20 และ 30 นิวตันที่ความเร็ว 15 และ 21 เซนติเมตรต่อนาที

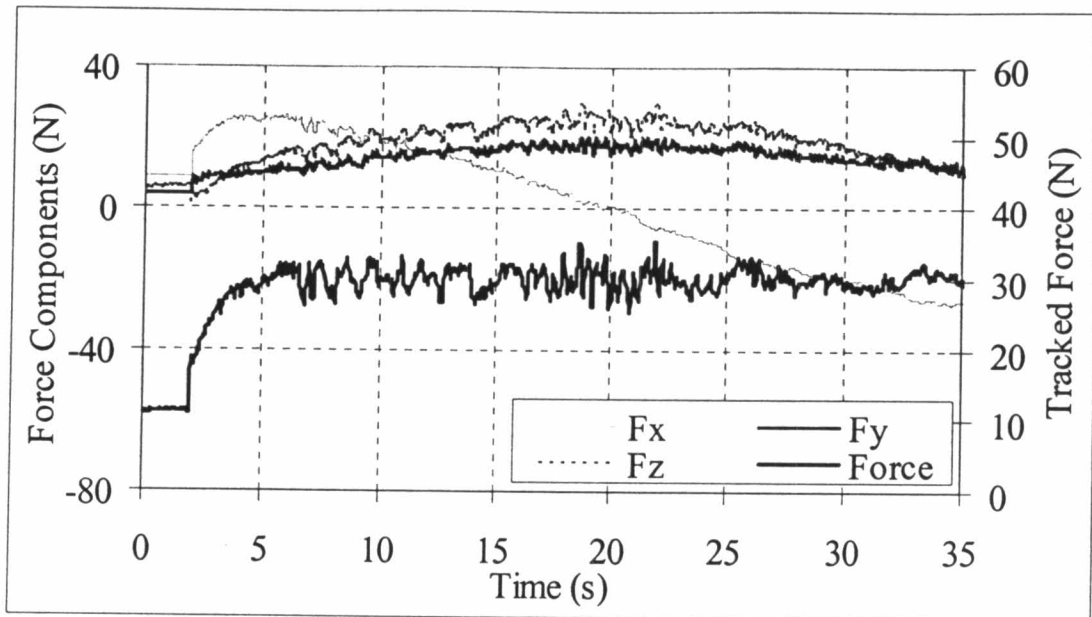


รูปที่ 4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก

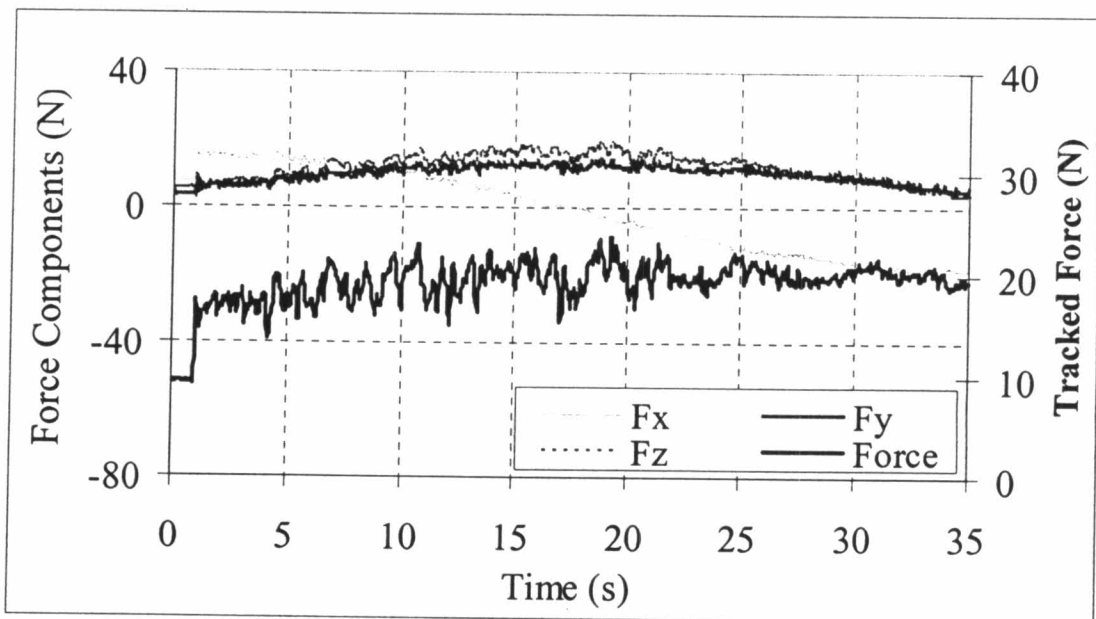


รูปที่ 4.15 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 30 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.15 เห็นได้ว่าส่วนประกอบของแรงในแนว x y และ z แปรเปลี่ยนไป ตามลักษณะพื้นผิวที่โค้ง



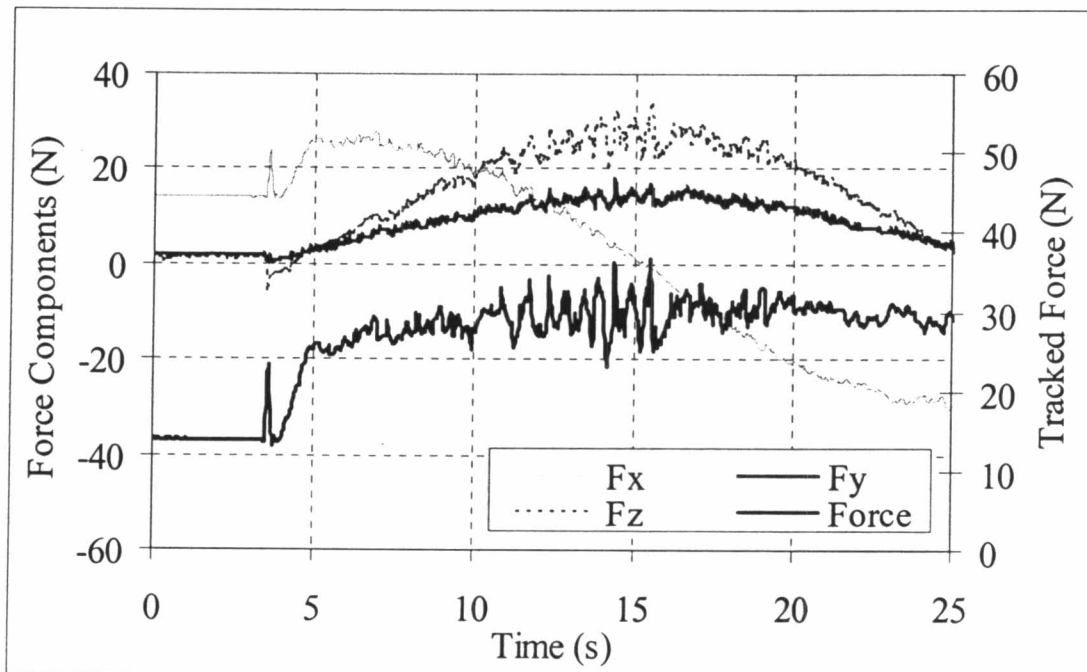
รูปที่ 4.16 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 30 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที



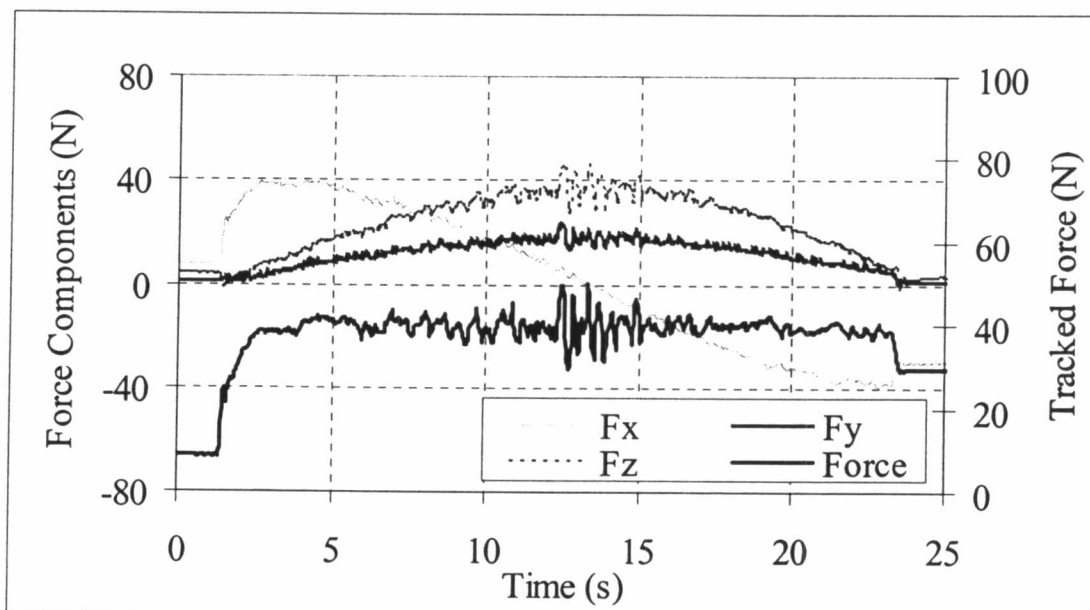
รูปที่ 4.17 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 20 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 พบว่ามีลักษณะเดียวกับการทดลองที่ผ่านมากล่าวคือ มีความผิดพลาดของแรงกดไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน แต่ในการทดลองนี้ไม่มีโอเวอร์ชูต จากรูปเห็นได้ว่าบริเวณที่มีความแปรปรวนมากที่สุดคือบริเวณที่มีส่วนประกอบของแรงในแกน z สูงที่สุด และการควบคุมที่ความเร็วต่ำได้ผลตอบสนองดีกว่าที่ความเร็วสูง แรงกดที่สูงมีผลตอบสนองเร็วกว่าแรงกดต่ำ

การทดสอบในรูปที่ 4.18 และ 4.19 เป็นการทดสอบในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.14 แต่วัตถุเป็นอลูมิเนียม ความคุมแรงกดที่ 30 และ 40 นิวตัน โดยใช้ความเร็วขณะควบคุมแรงที่ 60 เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.18 การทดลองควบคุมแรงกดบนอลูมิเนียมที่แรงกด 30 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที

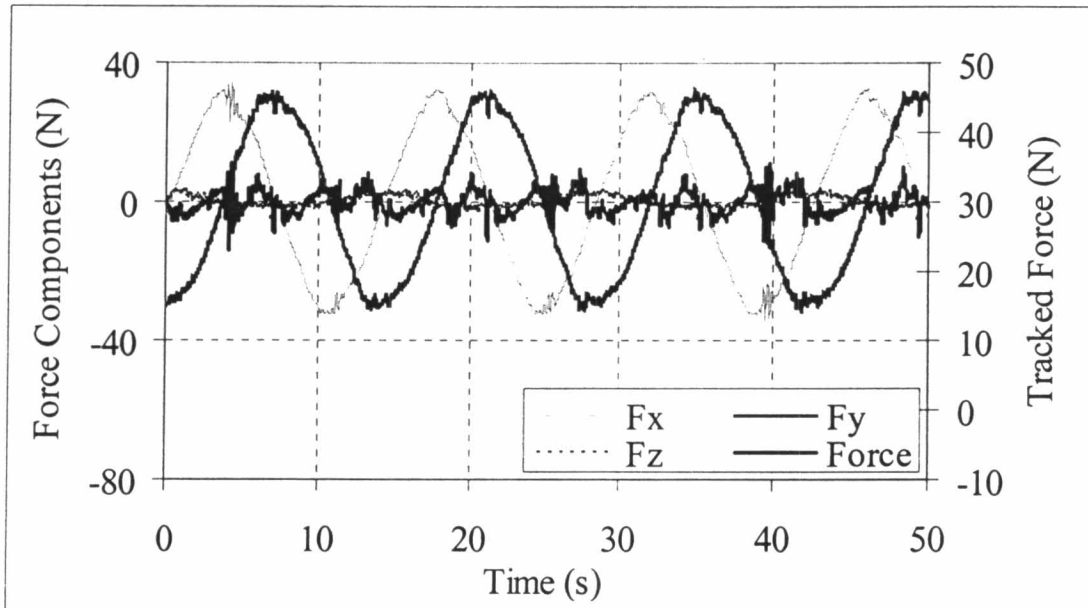


รูปที่ 4.19 การทดลองควบคุมแรงกดบนอลูมิเนียมที่แรงกด 40 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที

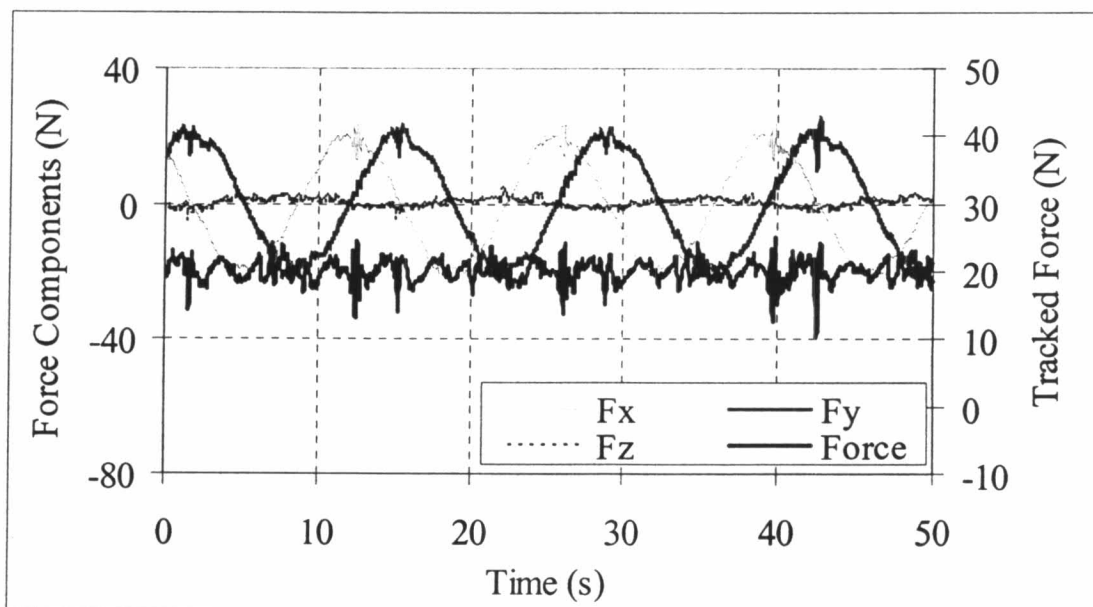
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมแรงให้มีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตันและ  $\pm 10$  นิวตันตามลำดับ และไม่มีโอเวอร์ชูต และบริเวณส่วนบนสุดของส่วน

โค้งมีความผิดพลาดของแรงในแกน  $z$  สูงสุดเช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมา แต่โดยรวมพบว่า ผลตอบสนองของการควบคุมแรงกดที่ 40 นิวตัน มีความเร็วกว่าการควบคุมแรงกดที่ 30 นิวตัน

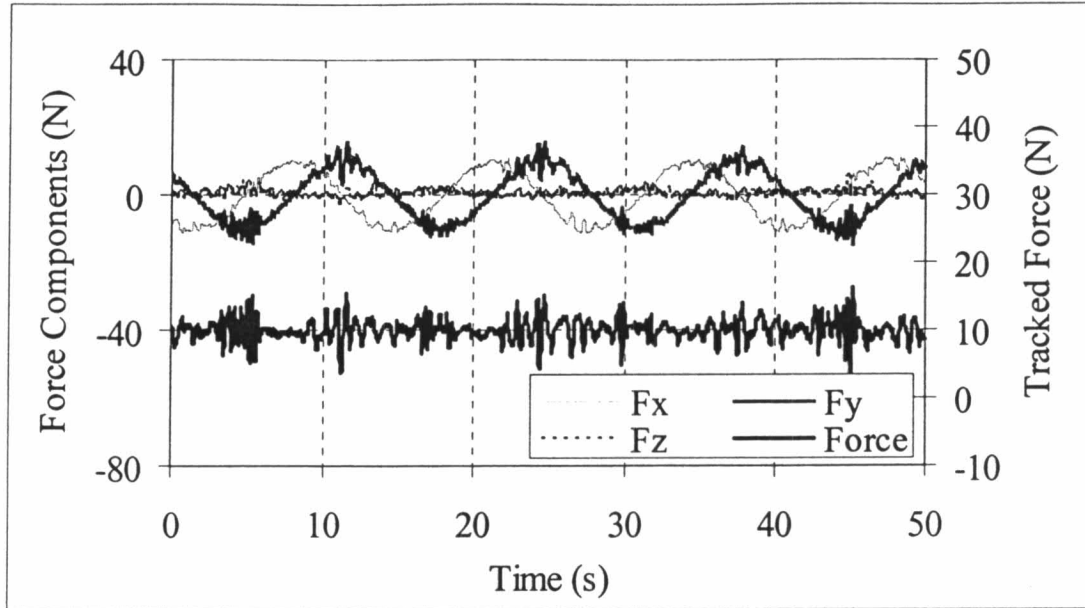
การทดสอบต่อไปดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.29 เป็นการทดสอบการควบคุมแรงกดบน เหล็ก เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านในในระนาบ  $xy$  ที่แรงกดและความเร็วต่างๆ



รูปที่ 4.20 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กที่ทิศทางเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อวินาที

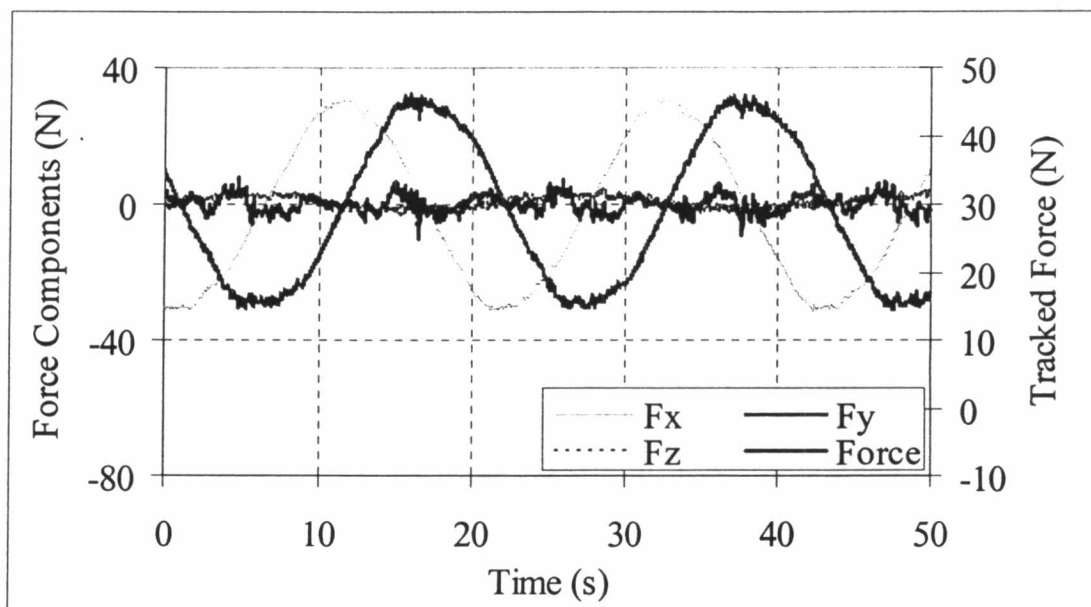


รูปที่ 4.21 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กที่ทิศทางเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 20 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อวินาที

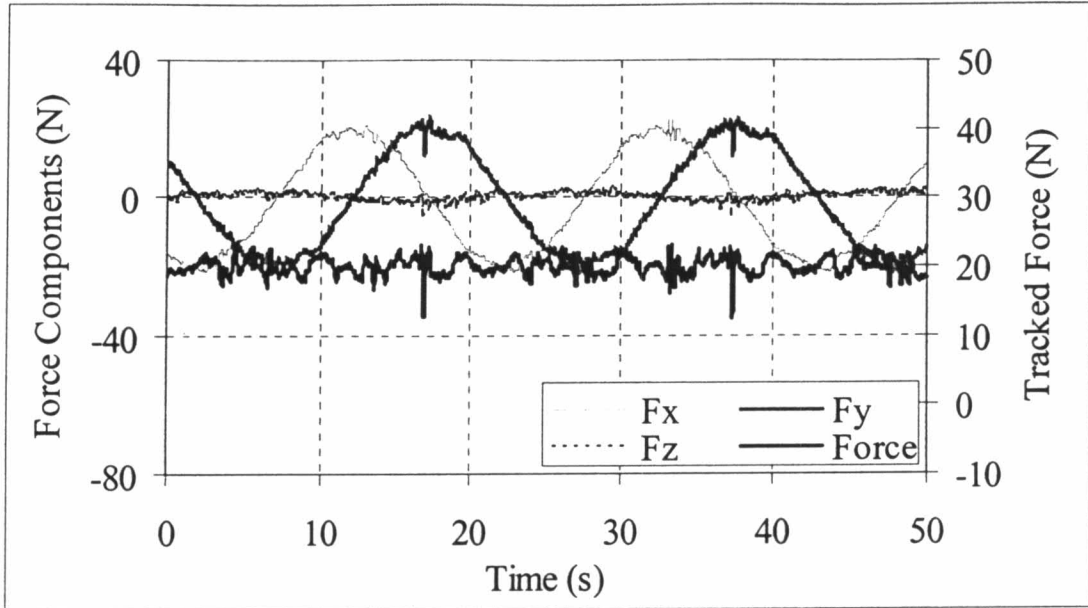


รูปที่ 4.22 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กทิสทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N  
ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที

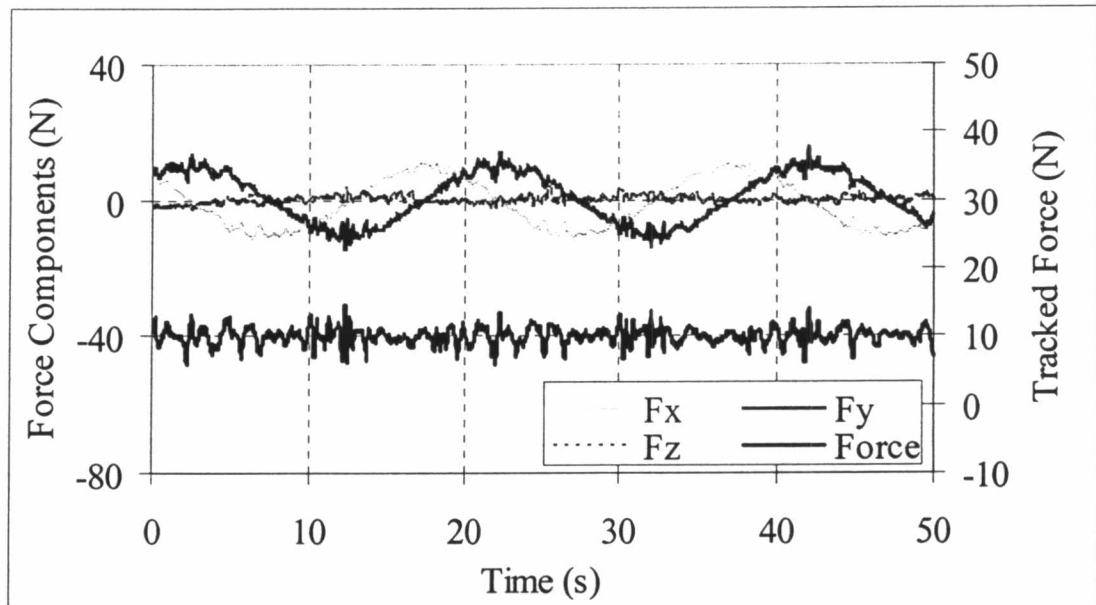
รูปที่ 4.20 ถึง 4.22 เป็นการควบคุมแรงกดที่ 10 20 และ 30 นิวตันที่ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที จากการทดสอบพบว่าส่วนประกอบของแรงในแกน x และ y มีลักษณะเป็นฟังก์ชัน sin และ cos ตามลักษณะพื้นผิวที่เป็นวงกลม จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 ความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน



รูปที่ 4.23 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กทิสทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N  
ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.24 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กทึบทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 20 N  
ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที

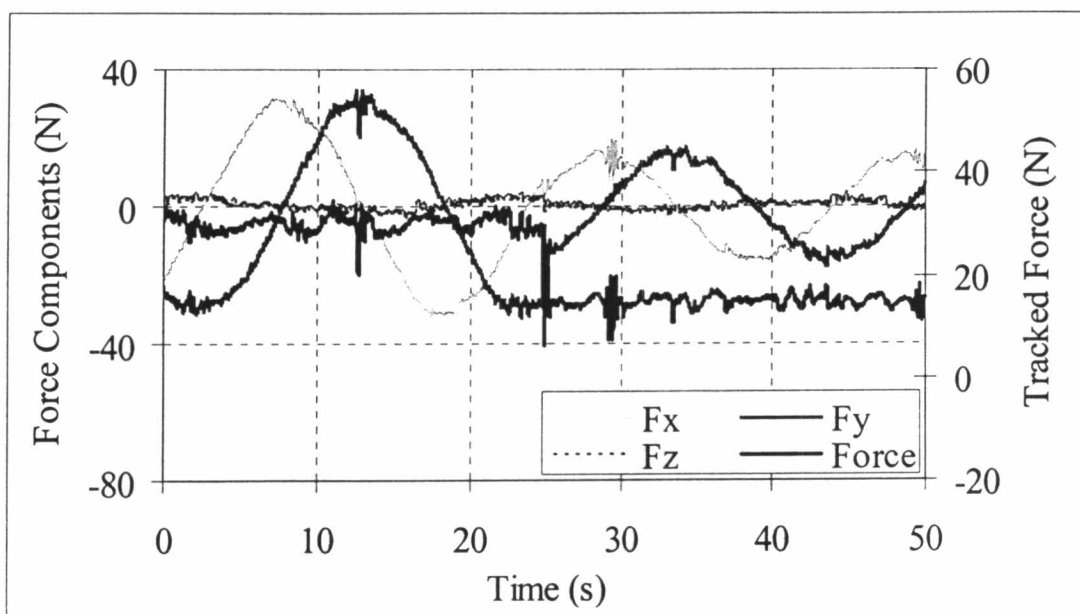


รูปที่ 4.25 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็กทึบทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N  
ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที

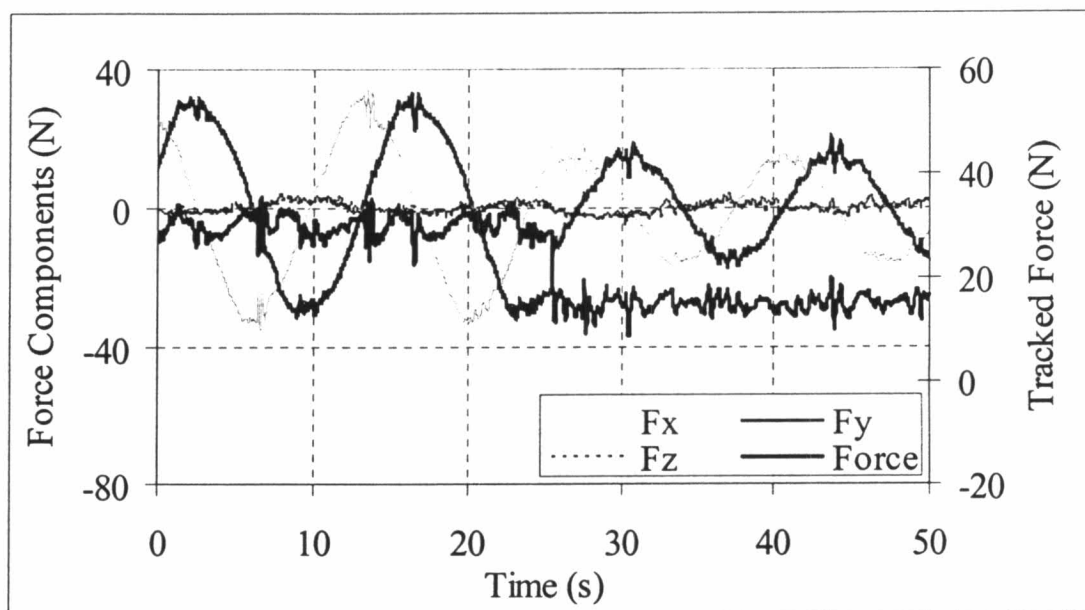
การทดสอบดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 ใช้ความเร็วต่ำลงคือ 24 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าได้ผลเช่นเดียวกันคือความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน และผลตอบสนองโดยรวมมีความราบเรียบใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.26 และ 4.27 เป็นการทดสอบโดยแปรเปลี่ยนแรงกดแบบขั้นบันไดจาก 30 นิวตัน เป็น 15 นิวตันที่ความเร็ว 36 และ 24 เซนติเมตรต่อนาที



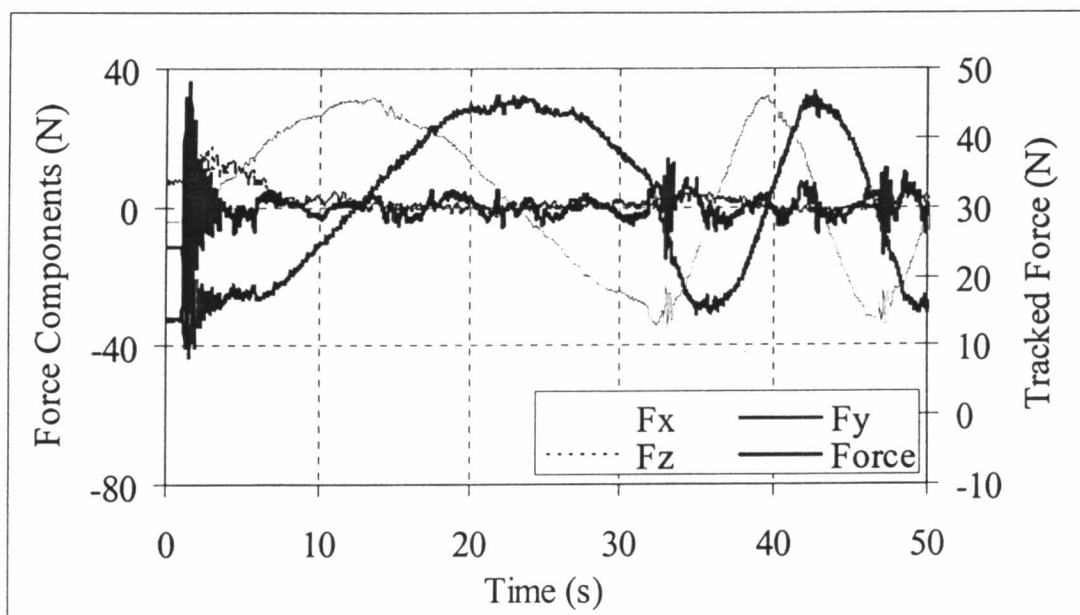
รูปที่ 4.26 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที



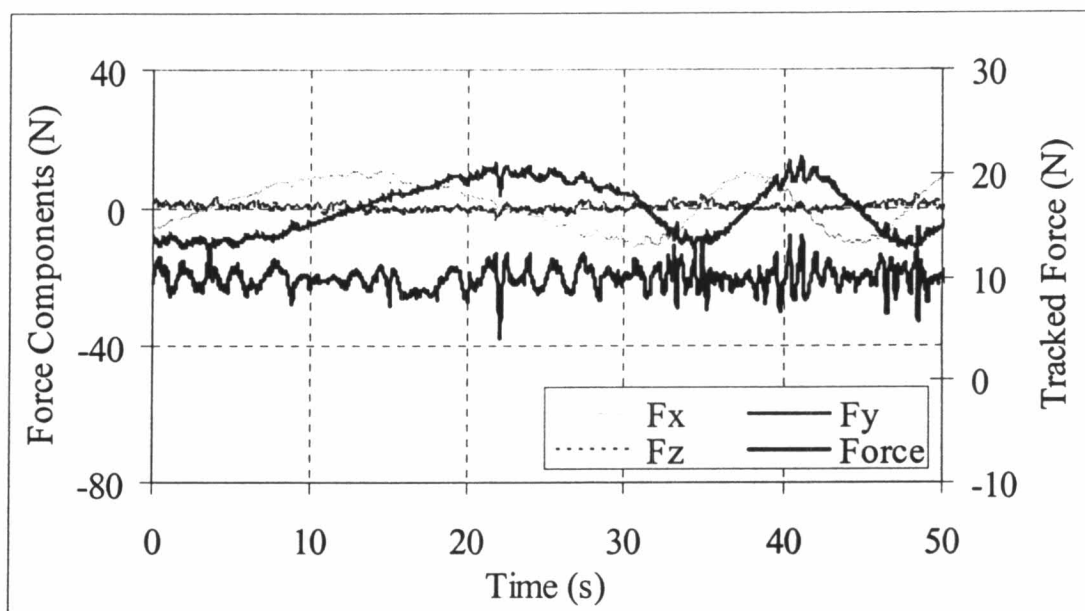
รูปที่ 4.27 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าตัวควบคุมตอบสนองต่อคำสั่งแรงที่เปลี่ยนแปลงได้ดีและมีความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน

รูปที่ 4.28 และ 4.29 เป็นการทดสอบโดยแปรเปลี่ยนความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 12 เป็น 36 เซนติเมตรต่อนาที ที่แรงกด 10 และ 30 นิวตัน



รูปที่ 4.28 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N ความเร็วเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 12 และ 36 เซนติเมตรต่อนาที

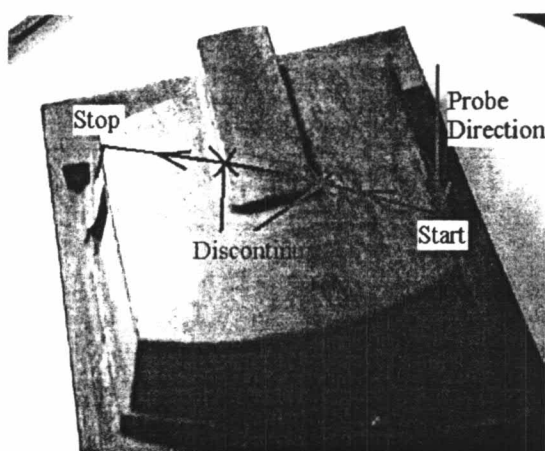


รูปที่ 4.29 การทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N ความเร็วเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 12 และ 36 เซนติเมตรต่อนาที

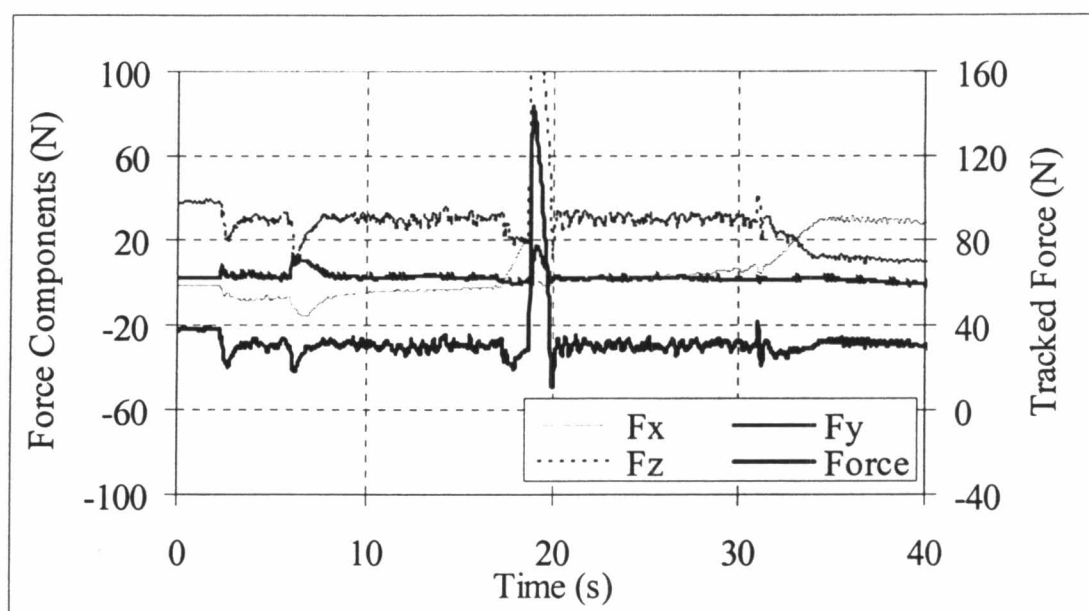
จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน และการเปลี่ยนแปลงแรงกดและความเร็วขณะควบคุมแรงกดไม่มีผลต่อการตอบสนองมากนัก แต่โดยรวมพบว่าผลตอบสนองที่แรงกดมากจะราบเรียบกว่าผลตอบสนองที่แรงกดน้อยเช่นกัน

#### 4.2.2.2 การควบคุมแรงบนวัตถุที่มีพื้นผิวไม่ต่อเนื่อง

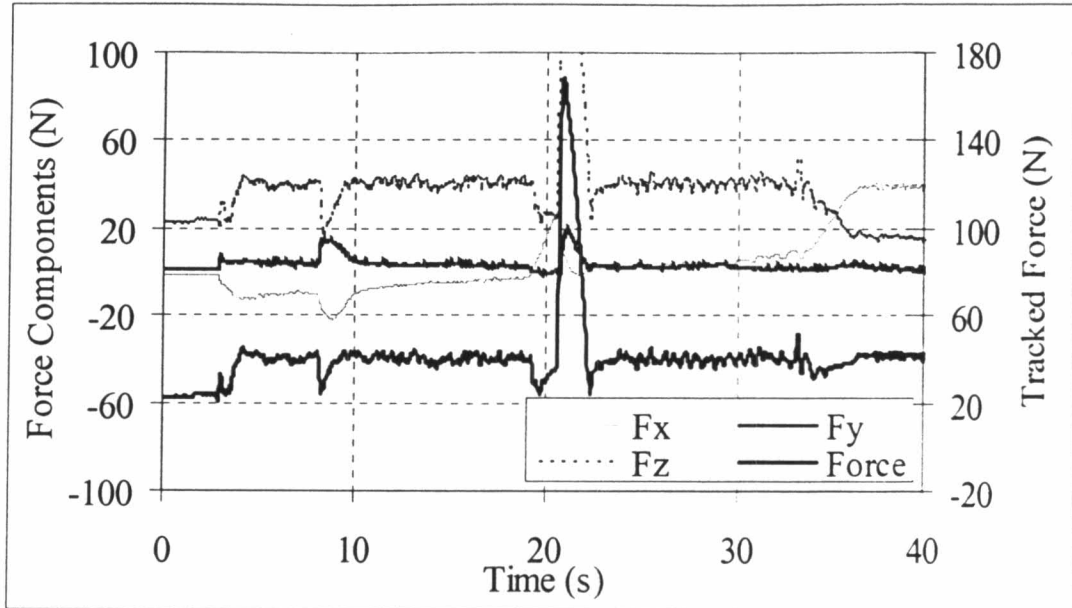
ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 เป็นการทดสอบการควบคุมแรงบนไม้ที่มีพื้นผิวไม่ต่อเนื่อง ลักษณะพื้นผิวและทิศทางการควบคุมแรงแสดงในรูปที่ 4.30 จากรูปเห็นได้ว่ามีความไม่ต่อเนื่องสองแห่ง การทดสอบนี้กระทำโดยควบคุมแรงกดที่ 30 และ 40 นิวตัน โดยควบคุมความเร็วที่ 18 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.30 การทดลองควบคุมแรงกดบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได



รูปที่ 4.31 การทดลองควบคุมแรงกดบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงกด 30 N  
ความเร็ว 18 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.32 การทดลองควบคุมแรงยกบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดแรงกด 40 N  
ความเร็ว 18 เซนติเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 พบว่าผลตอบสนองของแรงมีการเปลี่ยนแปลงของแรงอย่างทันทีทันใดที่สองแห่งได้แก่ที่วินาทีที่ 7 ถึง 8 โดยตำแหน่งนี้มีขนาดของแรงสูงสุดไม่มากนัก แต่ตำแหน่งที่สองที่วินาทีที่ 20 มีขนาดของแรงสูงสุดที่ 140 และ 160 นิวตันตามลำดับ เนื่องจากตัววัดแรงกระแทกกับพื้นผิววัตถุก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงพื้นผิวต่อเนื่อง ตัวควบคุมสามารถลดความผิดพลาดของแรงลงได้ภายในเวลา 2 ถึง 3 วินาที ความผิดพลาดโดยรวมของแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน

การทดลองที่ 4.33 ถึง 4.36 เป็นการทดสอบการควบคุมแรงบนลู่วิ่งโดยมีทิศทางควบคุมแรงเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.14 แต่มีการปรับมุมของตัวตรวจรู้แรงให้ตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุ โดยอาศัยทิศทางของแรงที่วัดได้ นำมาคำนวณหาทิศตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ นำเวกเตอร์ตั้งฉากดังกล่าวมาเป็นคำสั่งให้ตัวควบคุมตำแหน่งควบคุมมุมเอียงของ Platform ให้ได้ตามต้องการ

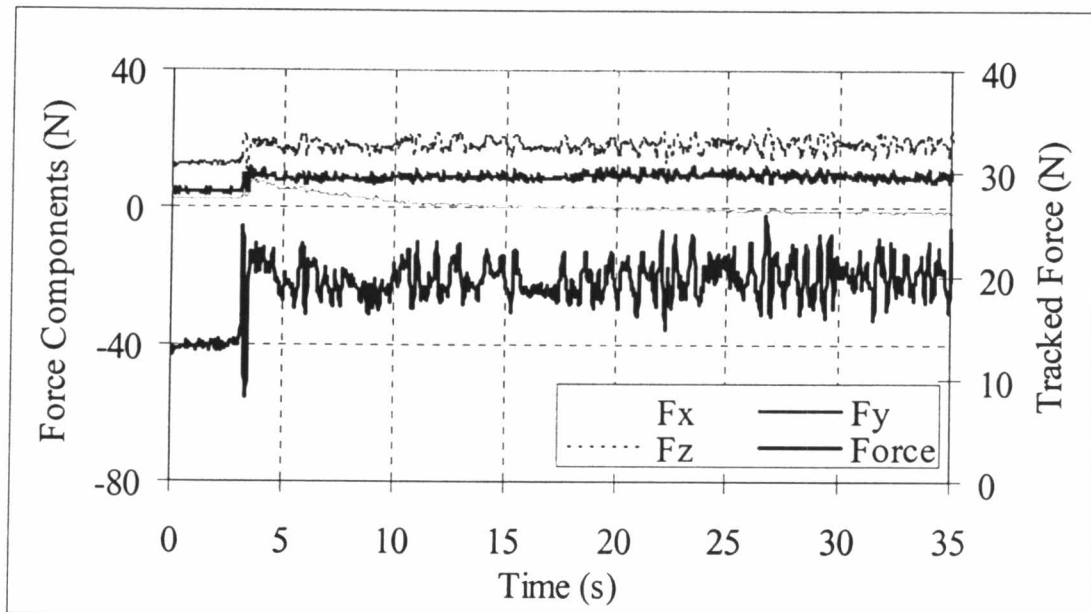
ตัวควบคุมมุมเอียงของ Platform อยู่ในรูป

$$\theta_k = \theta_{k-1} + K_\theta \cdot \text{delta}(\theta_{k-1} - \theta_{normal}) \quad (4.1)$$

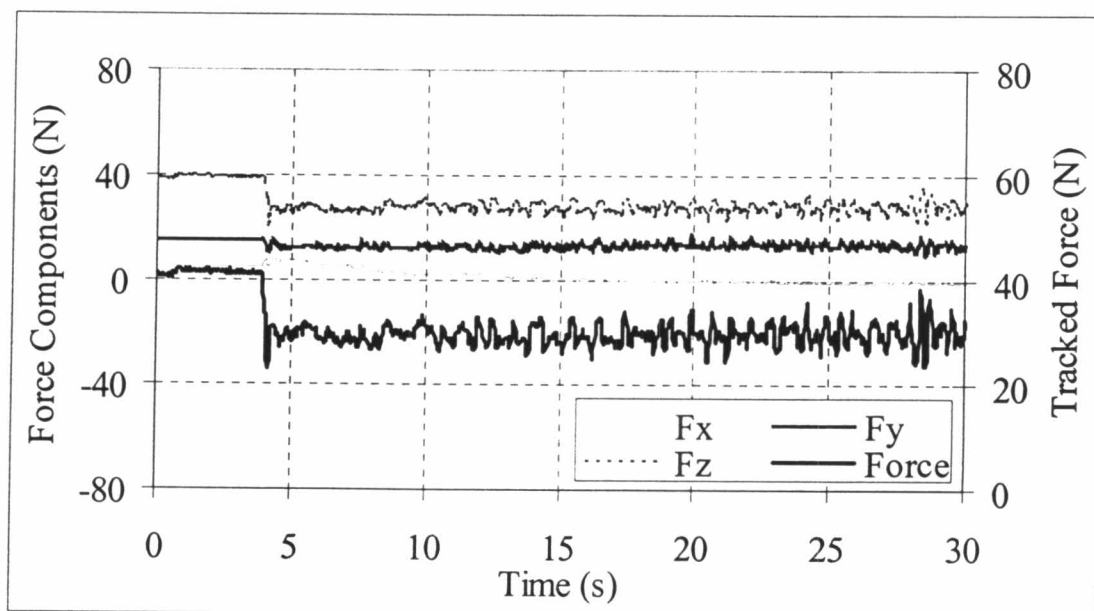
เห็นได้ว่ามุมเอียงของ Platform จะปรับเข้าสู่มุมตั้งฉาก ( $\theta_{normal}$ ) โดยที่ delta เป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุน และ  $K_\theta$  เป็นอัตราการเรียนรู้ค่าที่ต้องการ จะเห็นได้ว่ามุมของ platform จะไม่เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันแต่จะพยายามลู่อู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ

### 4.2.2.3 การควบคุมแรงกดโดยแปรเปลี่ยนมุม platform ให้ตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ

รูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นการควบคุมแรงกดที่ 20 และ 30 นิวตัน โดยใช้ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อวินาที และรูปที่ 4.35 และ 4.36 ใช้ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อวินาที

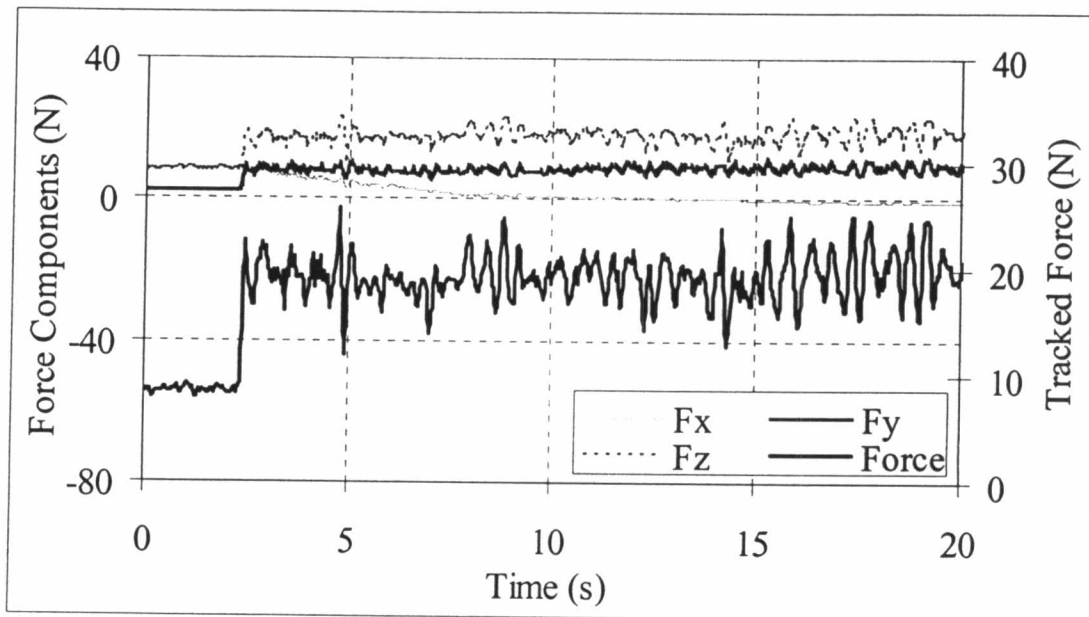


รูปที่ 4.33 การทดลองควบคุมแรงกดบนอลูมิเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 20 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อวินาที

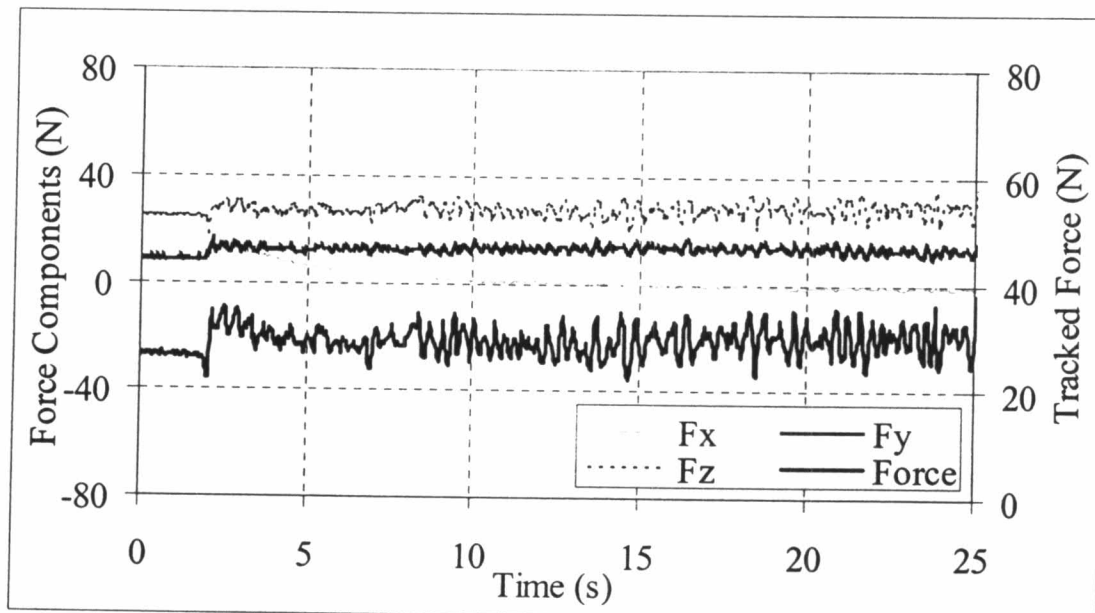


รูปที่ 4.34 การทดลองควบคุมแรงกดบนอลูมิเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 30 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.33 พบว่าความผิดพลาดในการควบคุมแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน และรูปที่ 4.34 ไม่เกิน  $\pm 10$  นิวตัน เห็นได้ว่าแรงในแนวแกน y และ z ค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.35 การทดลองควบคุมแรงกบนอลูมิเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 20 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที



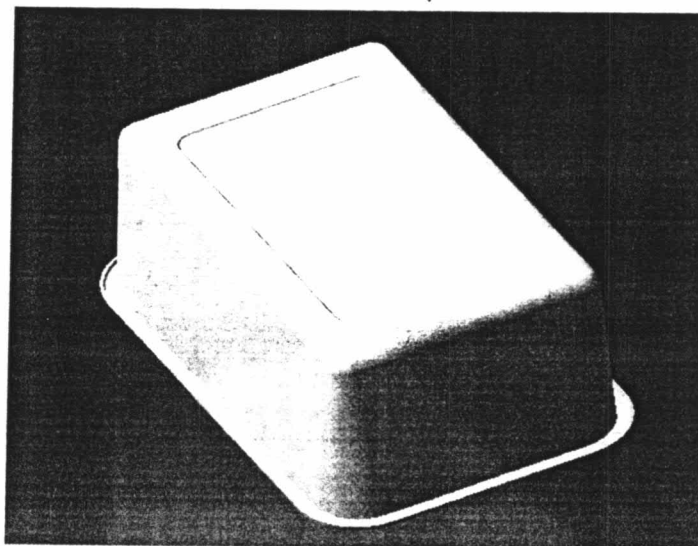
รูปที่ 4.36 การทดลองควบคุมแรงกบนอลูมิเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 30 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.35 พบว่าความผิดพลาดในการควบคุมแรงไม่เกิน  $\pm 5$  นิวตัน และรูปที่ 4.36 ไม่เกิน  $\pm 10$  นิวตัน เห็นได้ว่าแรงในแนวแกน y และ z ค่อนข้างคงที่ ความเร็วที่เพิ่มขึ้นมี

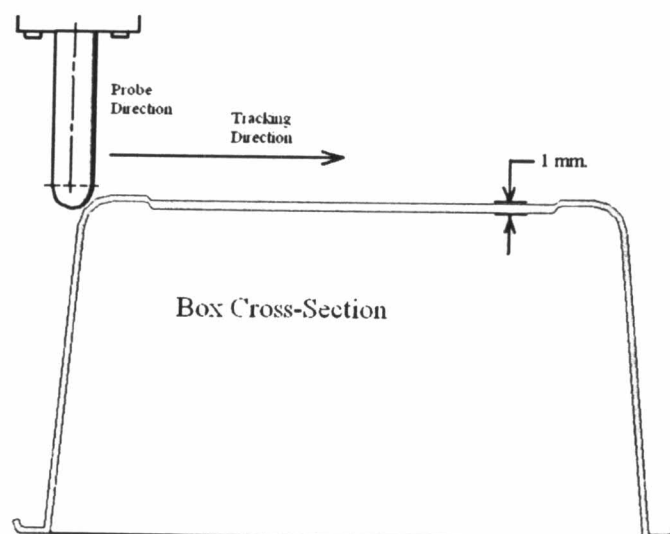
ผลต่อการตอบสนองของแรงเล็กน้อย การควบคุมแรงกดที่มากจะมีการแปรปรวนของผลตอบสนองแรงมากกว่า

#### 4.2.2.4 การควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความยืดหยุ่น

การทดลองสุดท้ายจะเป็นการควบคุมแรงบนวัตถุที่มีความยืดหยุ่นตัว วัตถุที่ใช้คือ ก้อนใส่อาหารทำจากโฟมดังในรูปที่ 4.37 ในการทดลองนี้ตัวควบคุมจะใช้ความแข็งแรงของวัตถุเพื่อคำนวณหาระยะกด แทนที่จะใช้ความแข็งแรงของหุ่นยนต์ดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา

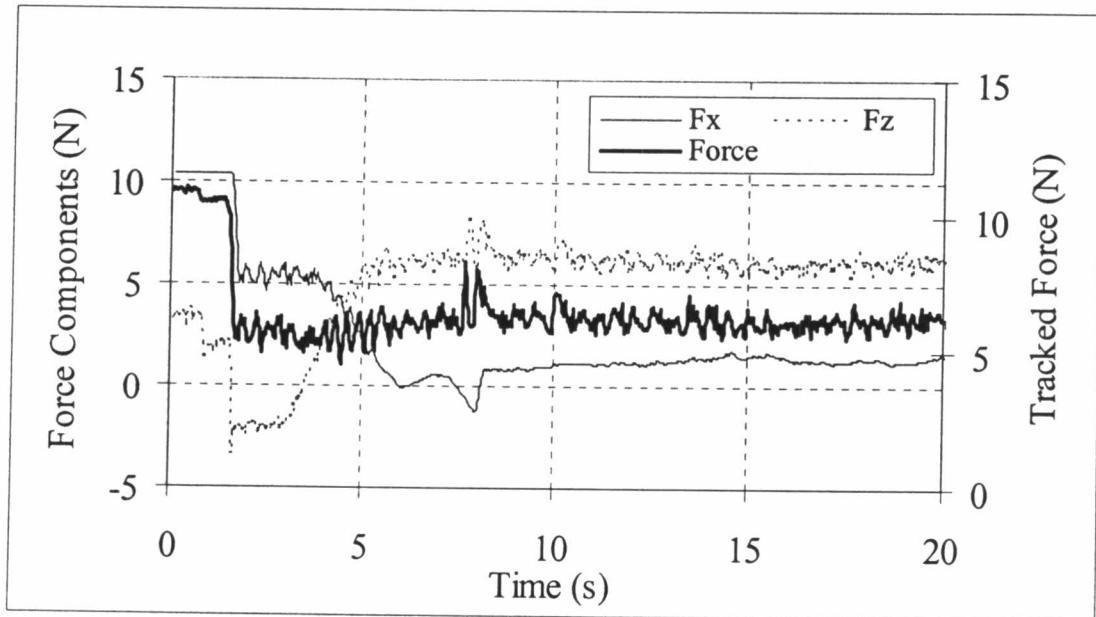


รูปที่ 4.37 ลักษณะของวัตถุที่มีความยืดหยุ่นซึ่งใช้ในการทดลองควบคุมแรงกด

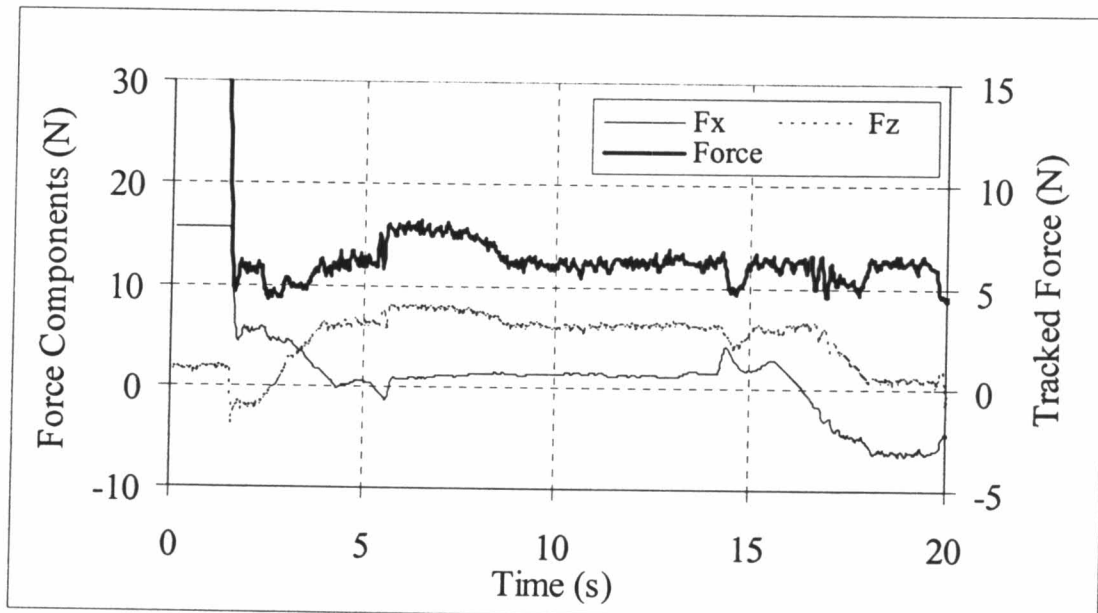


รูปที่ 4.38 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลในการควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความยืดหยุ่น วัสดุที่ใช้คือก้อนใส่อาหารทำจากโฟมมีความหนา 1 มิลลิเมตร และมีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวสองแห่ง

ผลการทดสอบนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.39 ถึง 4.44 โดยในรูปที่ 4.39 ถึง 4.42 เป็นการควบคุมแรงกดที่ 7 นิวตัน และใช้ความเร็วขณะควบคุมแรงกดที่ 15 30 45 และ 60 เซนติเมตร ต่อนาที และรูปที่ 4.43 และ 4.44 ใช้แรงกด 10 นิวตันที่ความเร็ว 45 และ 60 เซนติเมตรต่อนาที

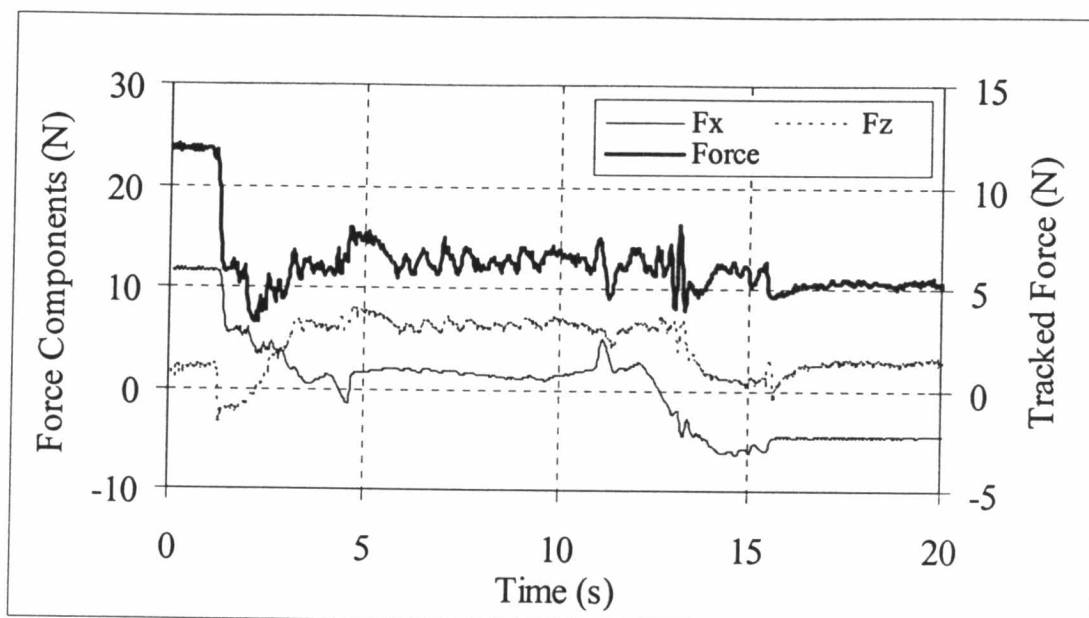


รูปที่ 4.39 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที

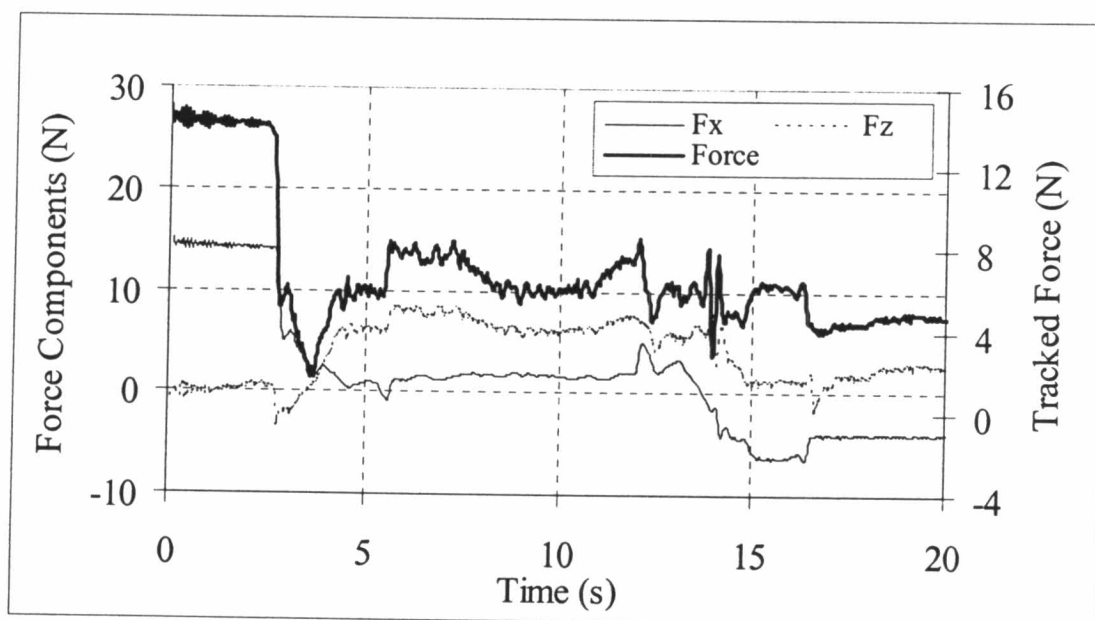


รูปที่ 4.40 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 30 เซนติเมตรต่อนาที



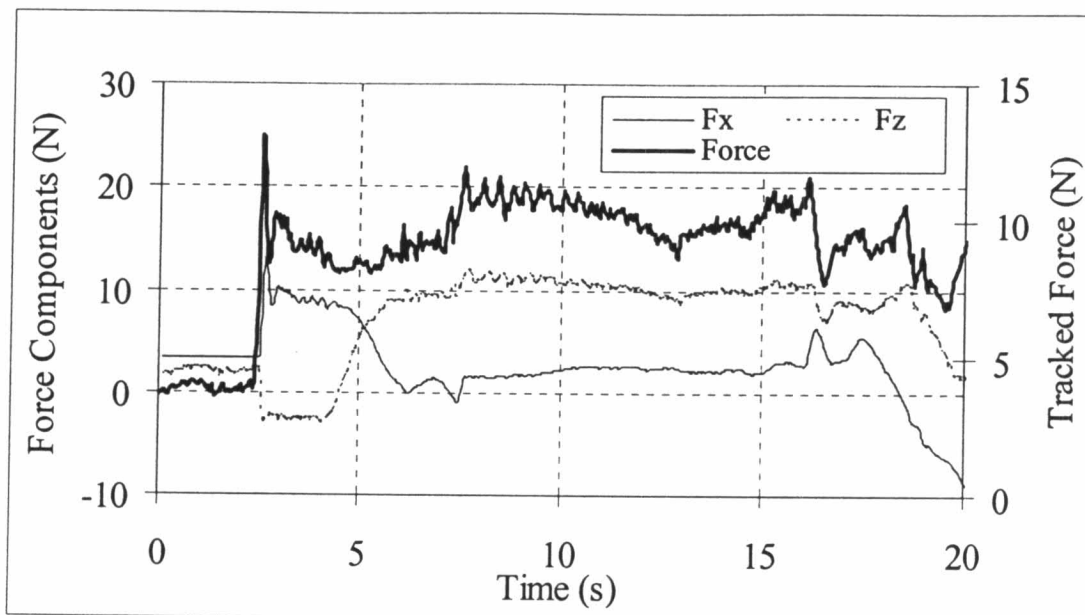


รูปที่ 4.41 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 45 เซนติเมตรต่อนาที

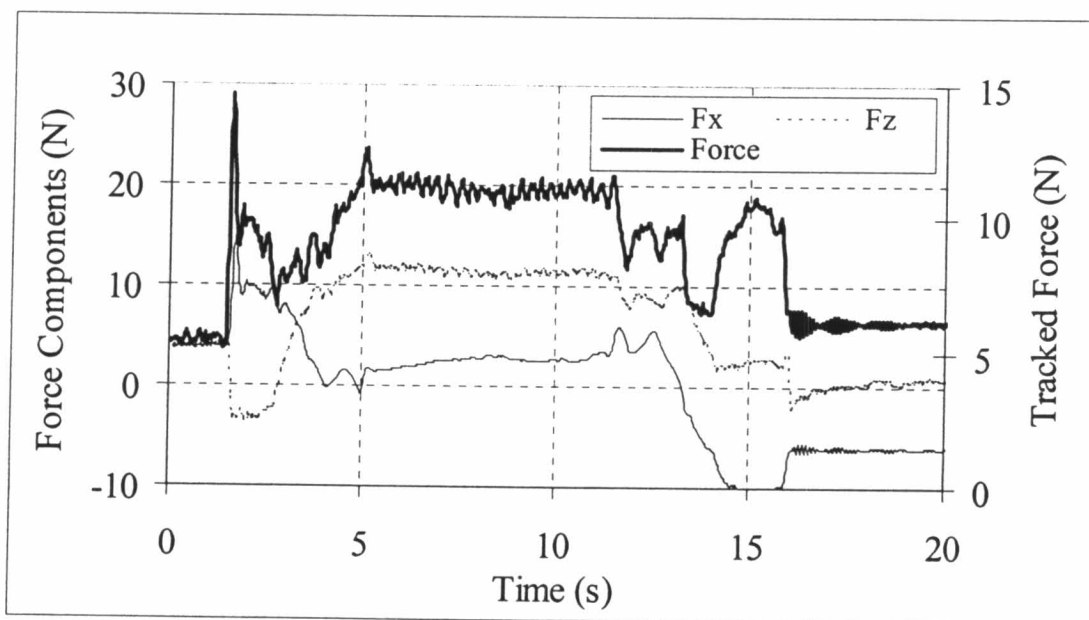


รูปที่ 4.42 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.39 ถึง 4.42 เห็นได้ว่าความผิดพลาดของแรงไม่เกิน  $\pm 2$  นิวตันในช่วงที่มีพื้นผิวต่อเนื่อง เมื่อใช้ความเร็วต่ำจะได้ผลตอบสนองของแรงอย่างดีเยี่ยม โดยเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางของแรงอย่างรวดเร็ว คือช่วงขอบของวัตถุที่พื้นผิวเปลี่ยนจากผนังด้านข้างมาเป็นผนังด้านบน ผลตอบสนองจะมีการแกว่งเมื่อแขนกลเคลื่อนผ่านขอบวัตถุมากขึ้นเมื่อความเร็วขณะควบคุมแรงกดมากขึ้น



รูปที่ 4.43 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยึดหยุ่นที่แรงกด 10 N ความเร็ว 45 เซนติเมตรต่อ  
นาที่



รูปที่ 4.44 การทดลองควบคุมแรงกดบนวัตถุยึดหยุ่นที่แรงกด 10 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อ  
นาที่

จากรูปที่ 4.43 และ 4.44 เห็นได้ว่าการควบคุมแรงกดที่มากขึ้นมีผลต่อการตอบสนองของแรงเพียงเล็กน้อย ความผิดพลาดในสถานะคงตัวของการทดลองที่ 4.44 มีค่าประมาณ 2 นิวตัน

### 4.3 อภิปรายผลการทดสอบ

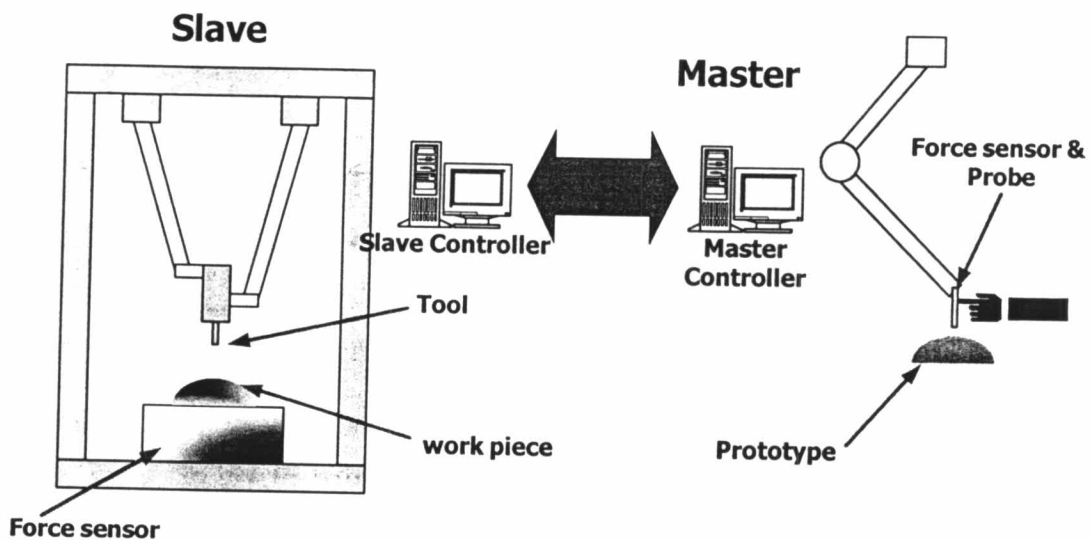
จากผลการทดสอบทั้งหมด สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. ในการควบคุมแรงกดโดยควบคุมให้มุมเอียงของ Platform คงที่นั้นพบว่า การควบคุมแรงกดที่มากให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าการควบคุมแรงกดที่น้อยกว่า เนื่องจาก ลักษณะของแกนกลแบบขนานนี้มีความแข็งแกร่งสูง โดยเฉพาะในทิศทาง z การควบคุมแรงโดยหาความสัมพันธ์ของแรงกับระยะทางโดยใช้ เมตริกซ์ความแข็งแกร่งของแกนกลนั้นพบว่า ระยะกดที่คำนวณได้จากแรงนั้นมีค่าน้อยมาก ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร การควบคุมตำแหน่งเล็กน้อยนี้จะกระทำได้อย่าง
2. สำหรับพื้นผิวเรียบหรือเอียงทำมุมคงที่พบว่าสามารถควบคุมแรงกดได้อย่างดี เนื่องจากส่วนประกอบของแรงมีค่าคงที่ กล่าวคือค่าผิดพลาดระหว่างแรงที่ต้องการกับแรงที่วัดได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แต่หากพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงความโค้ง แรงที่วัดได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ทั้งขนาดและทิศทางทำให้ตัวควบคุมแรงต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อควบคุมแรงให้เข้าสู่สภาวะคงตัว หากความเร็วขณะควบคุมแรงสูงเกินไปอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้
3. การคำนวณระยะยวบตัวของแกนกลเพื่อให้ได้แรงกดที่ต้องการมีส่วนช่วยให้การควบคุมแรงมีเสถียรภาพมากขึ้น กล่าวคือตัวควบคุมแบบ Integrator ต้องใช้เวลา ระยะหนึ่งเพื่อควบคุมความผิดพลาดของแรงให้เป็นศูนย์ หากการยวบตัวที่คำนวณได้ทำให้ได้แรงกดใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการจะทำให้ตัวควบคุมใช้เวลาสั้นลง ทำให้ค่าผิดพลาดของแรงลดลงได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ
4. ความไม่แน่นอนของผลตอบสนองของแรงเกิดจากหน้าสัมผัสของ probe ซึ่งต่อเข้ากับตัวตรวจรู้แรงกับพื้นผิววัตถุไม่เรียบ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุไม่ราบเรียบทำให้เกิดแรงเสียดทานจึงทำให้ค่าที่วัดได้ไม่แน่นอน
5. การควบคุมแรงบนพื้นผิวไม่ต่อเนื่องเห็นได้ว่าเมื่อ probe วัดแรงชนกับพื้นผิววัตถุทำให้เกิดแรงสูงสุดชั่วขณะ ซึ่งขนาดของแรงจะขึ้นกับแรงที่กด และ ความเร็วของแกนกลในขณะนั้น แต่จากการทดสอบเห็นได้ว่าตัวควบคุมแรงสามารถควบคุมแรงที่มากขึ้นไปนั้นให้กลับสู่สภาวะปรกติได้อย่างรวดเร็ว
6. การควบคุมแรงโดยปรับมุมเอียง Platform ให้ตั้งฉากกับผิววัตถุนั้นพบว่า ได้ผลเช่นเดียวกับเมื่อมุม platform คงที่ แต่จากการสังเกตพบว่ามุมของ platform ไม่ตั้งฉากกับผิววัตถุอย่างสมบูรณ์เนื่องจากสมการที่ 4.1 และผลของแรงเสียดทานของวัตถุทำให้ทิศทางของแรงที่คำนวณได้ไม่ตั้งฉากกับพื้นผิว

7. การควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความหยุ่นตัวพบว่าหากใช้ความแข็งตึงของวัตถุจะทำให้ควบคุมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากวัตถุมีความแข็งเกร็งน้อยทำให้ระยะกดที่คำนวณ ได้มีค่ามากทำให้การควบคุมแรงมีความผิดพลาดน้อยกว่าการควบคุมแรงบนวัตถุแข็ง
8. เนื่องจากวิธีการควบคุมแรงโดยใช้ความแข็งเกร็งของวัตถุแข็งไม่เป็นผลสำเร็จ จึงกล่าวได้ว่าการใช้เมตริกซ์ความแข็งเกร็งของแกนกลแทนความแข็งเกร็งของวัตถุในกรณีที่วัตถุยุบตัวได้น้อยหรือไม่สามารถยุบตัวได้นั้น ทำให้ควบคุมแรงบนพื้นผิวที่มีความโค้งไม่แน่นอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.4 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแขนกลแบบขนานรูปแบบใหม่ในตระกูล H-4 พร้อมด้วยการควบคุมแรง แขนกลที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเช่น เครื่องวัดพิทกัตต์โนมิติ การควบคุมแบบ Master-Slave [Sangveraphunsiri 2002] นอกจากนี้ยังสามารถวิจัยต่อเนื่องเป็นเครื่องกัดห้าแกน โดยการเพิ่มฐานหมุนให้กับแขนกลอีกหนึ่งแกน



รูปที่ 4.45 งานวิจัยในอนาคต การควบคุมระบบ Master-Slave

งานวิจัยในอนาคตรูปแบบหนึ่งได้แก่งาน Rapid prototype โดยใช้ผู้ควบคุมแบบ Master-Slave กล่าวคือใช้มนุษย์ในการตัดสินใจเลือกทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวกัด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องสร้างโค้ดสำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลล่วงหน้า แขนกล Master จะช่วยให้คนทำงานง่ายขึ้น โดยการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่โดยการสร้างกำแพงเสมือนเพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมหัวกัดในทิศทางที่กำหนดได้ง่ายขึ้น และยังมีตัว

ตรวจรู้แรงที่ตัว Master และ Slave เพื่อถ่ายทอดแรงทำให้ผู้ใช้รู้ถึงสภาพจริงในขณะที่กดขึ้นงานว่ามีแรงกดมากน้อยเกินไปหรือไม่ เพื่อควบคุมแรงกดให้ได้ขึ้นงานที่มีคุณภาพ

นอกเหนือจากการประยุกต์ใช้ดังกล่าวมาแล้วยังมีแนวทางวิจัยเกี่ยวกับระบบการควบคุมแรงขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้สามารถทำงานประกอบชิ้นส่วนได้ โดยอาจนำพลังของแขนกลเข้าไปมีส่วนร่วมในการควบคุมด้วย ทำให้ระบบตอบสนองได้รวดเร็วยิ่งขึ้น