

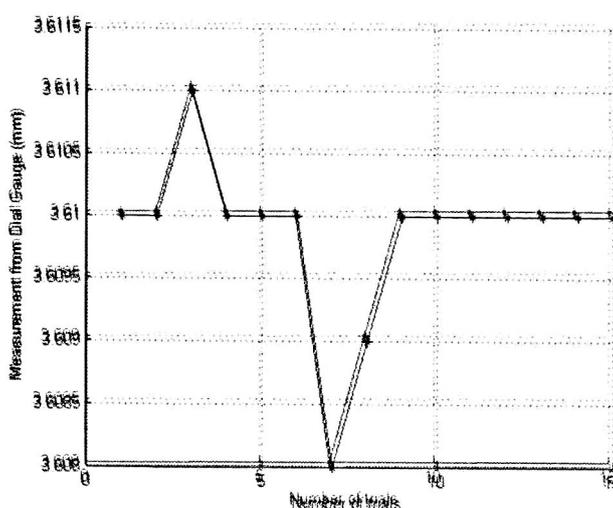
## บทที่ 4

การทดลองในบทนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการทดสอบประสิทธิภาพที่วัดจากความคลาดเคลื่อนที่ของการเคลื่อนที่ในสี่การทดลองแรก และ ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบการกดและการจำลองการผ่าตัดเนื้อในสองการทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จะหาค่าความเที่ยงตรงของการทำงานซ้ำค่าเดิมของแขนหุ่นยนต์ และ การทดลองที่ 2 จะหาค่าความเที่ยงตรงของแขนหุ่นยนต์ในการยกน้ำหนักที่แตกต่างกัน และ การทดลองที่ 3 จะหาค่าความเที่ยงตรงในกรณีที่แขนหุ่นยนต์ทำงานที่ความเร็วแตกต่างกัน และ การทดลองที่ 4 ทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ด้วยสมการทางจลศาสตร์โดยใช้ Jacobian หรือ inverse kinematics และ การทดลองที่ 5 จะทดลองวัดแรงกดและแรงเสียดทานที่ผิวเบาะโดยใช้แขนหุ่นยนต์ และ การทดลองที่ 6 จะทดลองวัดแรงกดและแรงเสียดทานเมื่อทำการผ่าตัดเนื้อไก่และเนื้อหมู และ การทดลองที่ 6 จะจำลองการควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปพร้อมๆกัน โดยใช้เทคนิคแบบ impedance

### 4.1) การทดลองความแม่นยำในการทำงานซ้ำค่าเดิมของแขนหุ่นยนต์

ในการทดลองนี้ จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแขนหุ่นยนต์ เพื่อหาค่าความเที่ยงตรงของการทำงานซ้ำค่าเดิม โดยเราจะทำการทดสอบให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปแต่ละกับไดอัลเกจที่ติดตั้งไว้กับโต๊ะแล้วอ่านค่าที่วัดได้จากไดอัลเกจ หลังจากนั้นเราจะทำการทดลองซ้ำค่าเดิมทั้งหมด 14 ครั้ง โดยการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งซ้ำที่เดิมแล้วทำการอ่านค่าของไดอัลเกจ แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้ในแต่ละครั้ง

การทดลองจะใช้การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยที่กำหนดให้จำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ในแกน 1 = -30000 พัลส์, แกน 2 = 59000.0469 พัลส์, แกน 3 = 90000.0469 พัลส์, แกน 4 = 99598.8399 พัลส์ และ แกน 5 = -67999.5040 พัลส์ โดยส่งไปยังบอร์ด SPIPlus เพื่อให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปแต่ละไดอัลเกจในพิกัดที่กำหนด ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานซ้ำค่าเดิม แสดงในรูปที่ 4.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองหาความแม่นยำของปลายแขนหุ่นยนต์

จากการทดลองความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ซ้ำทั้งหมด 15 ครั้ง จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์นั้นมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าความผิดพลาดในตำแหน่งน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งจะแสดงว่าความผิดพลาดในแต่ละข้อต่อของแต่ละแกนมีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นความผิดพลาดรวมจากทั้ง 6 แกนจึงเป็นค่าที่น้อยมากดังผลในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แสดงการติดตั้งไดอัลเกจกับโต๊ะ (ซ้าย) และค่าของไดอัลเกจที่วัดได้เมื่อปลายแขนหุ่นยนต์กักที่ไดอัลเกจ (ขวา)



รูปที่ 4.3 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปแตะไดอัลเกจ

#### 4.2) การทดลองเพื่อทดสอบการยกน้ำหนักต่างกันโดยแขนหุ่นยนต์

ในการทดลองที่ 2 นั้นจะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าของความคลาดเคลื่อนของความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของชิ้นงานที่ยกโดยแขนหุ่นยนต์ โดยเราจะนำค้อนน้ำหนักขนาด 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม มาแขวนไว้ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ แล้วให้แขนหุ่นยนต์ยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 3 ค่าที่ต่างกันนี้ โดยเราจะทำการวัดค่าความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อแขนหุ่นยนต์ยกน้ำหนักที่แตกต่างกัน ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นเป็นผลต่างระหว่างคำสั่ง

ของความเร็วเชิงมุมของโปรแกรม SPiPlus และค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเอนโคเดอร์ที่ติดกับมอเตอร์ในแต่ละแกน

ตารางที่ 4.1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนของความเร็วของแขนหุ่นยนต์แบบ 6 แกน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ปลายแขน

แกน	ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุม(เรเดียนต่อวินาที)			
	ไม่มีมวล	มวล 1.2 กิโลกรัม	มวล 1.6 กิโลกรัม	มวล 2.0 กิโลกรัม
1	0.00079	0.00085	0.00098	0.00089
2	0.00019	0.00063	0.00021	0.00024
3	0.00002	0.00007	0.00092	0.00003
4	0.00232	0.00302	0.00258	0.00244
5	0.00004	0.00005	0.00005	0.00007

จากการทดลองนี้ในตารางที่ 4.1 เราจะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงาน โดยการใช้ตุ้มน้ำหนักเพิ่มที่ปลายแขนหุ่นยนต์จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมในแต่ละข้อต่อในการทำงานของแขนหุ่นยนต์เพิ่มมากขึ้นไปด้วย โดยดูได้จากกราฟของ ตำแหน่งอ้างอิงเทียบกับค่าของตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วของแขนหุ่นยนต์ในกรณีที่ไม่มีมวลมาแขวนที่ปลายแขน

$$\begin{aligned} \text{ในแกนที่ 1: ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว} &= \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสูงสุด} \times 2\pi}{4 \times \text{ความเร็วรอบ encoder1} \times \text{อัตราทดเกียร์1}} \\ &= \frac{80 \times 2\pi}{4 \times 2048 \times 78} = 0.00079 \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในแกนที่ 2: ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว} &= \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสูงสุด} \times 2\pi}{4 \times \text{ความเร็วรอบ encoder2} \times \text{อัตราทดเกียร์2}} \\ &= \frac{25.5 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 80} = 0.00019 \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

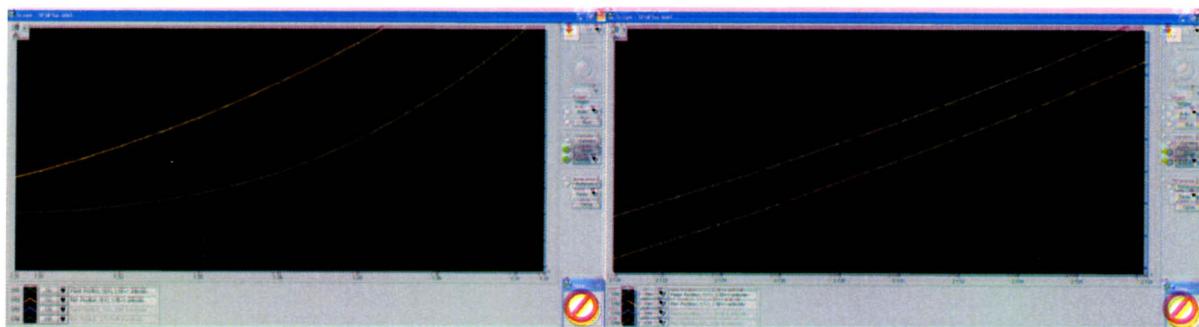
$$\begin{aligned} \text{ในแกนที่ 3: ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว} &= \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสูงสุด} \times 2\pi}{4 \times \text{ความเร็วรอบ encoder 3} \times \text{อัตราทดเกียร์3}} \\ &= \frac{2.1 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.00002 \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในแกนที่ 4: ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว} &= \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสูงสุด} \times 2\pi}{4 \times \text{ความเร็วรอบ encoder} \times 4 \times \text{อัตราทดเกียร์}^4} \\ &= \frac{185 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.00232 \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

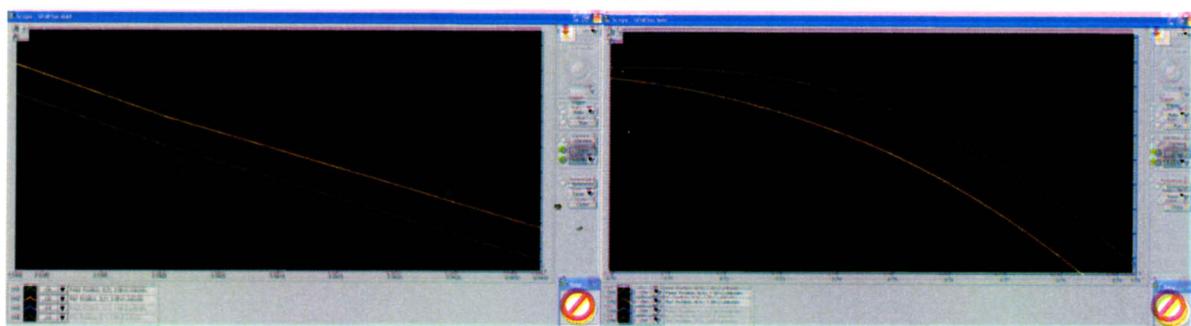
$$\begin{aligned} \text{ในแกนที่ 5: ความคลาดเคลื่อนของความเร็ว} &= \frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสูงสุด} \times 2\pi}{4 \times \text{ความเร็วรอบ encoder} \times 5 \times \text{อัตราทดเกียร์}^5} \\ &= \frac{3.9 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.00004 \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

ในรูปที่ 4.4 – 4.6 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมของแขนกลทั้งหกแกน เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ โดยไม่ได้ยกชิ้นงานหรือลูกตุ้ม

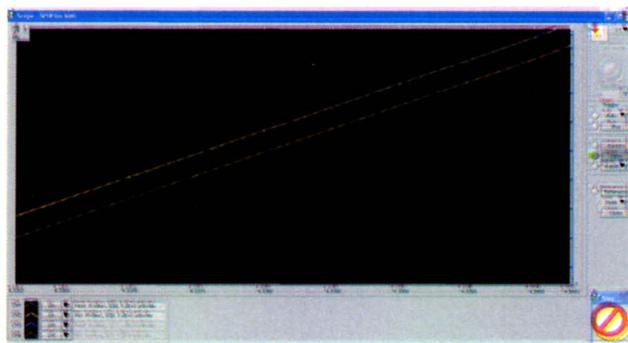
-  เส้นอ้างอิงหรือคำสั่งจาก โปรแกรม SPiiPlus (Reference)
-  เส้นตำแหน่งที่เคลื่อนจริงที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์ (Real Position)



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 1 (ซ้าย) และของแขนแกนที่ 2 (ขวา) เมื่อไม่มีมวลมาแขวน



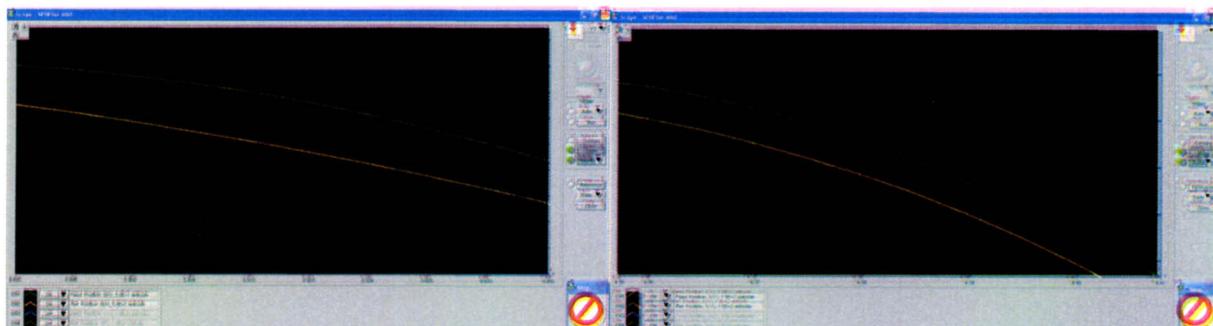
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 3 (ซ้าย) และของแขนแกนที่ 4 (ขวา) เมื่อไม่มีมวลมาแขวน



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 5 เมื่อไม่มีมวลมาแขวน

ในรูปที่ 4.7 – 4.9 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมที่มากที่สุดของแขนกลทั้งหกแกน เมื่อแขนกลยกชิ้นงานที่มีมวลต่างๆ ดังนี้ 1.2 kg. ,1.6 kg. และ 2.0 kg. ที่ต่อกับปลายแขนกล

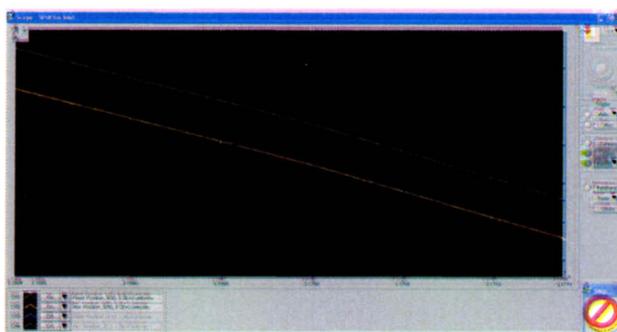
- เส้นอ้างอิงหรือคำสั่งจากโปรแกรม SPiiPlus(Reference)
- เส้นตำแหน่งที่เคลื่อนจริงที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์ (Real Position)



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 1 เมื่อมีมวล 1.6 kg. มาแขวนที่ปลายแขน (ซ้าย) และ ของแขนแกนที่ 2เมื่อมีมวล 1.2kg. มาแขวนที่ปลายแขน (ขวา)



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 3เมื่อมีมวล 1.6 kg. มาแขวนที่ปลายแขน (ซ้าย) และ ของแขนแกนที่ 4เมื่อมีมวล 1.2kg. มาแขวนที่ปลายแขน (ขวา)



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟของการเคลื่อนที่จริงเทียบกับค่าคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ของแขนแกนที่ 5  
เมื่อมีมวล 1.2kg. มาแขนที่ปลายแขน

#### 4.3) การทดลองความคลาดเคลื่อนที่ความเร็วรอบต่างๆ

ในส่วนการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อแขนหุ่นยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างกัน โดยความเร็วที่ใช้ทดสอบ คือ 20,000 พัลส์ต่อวินาที และ 30,000 พัลส์ต่อวินาที วิธีการทดสอบนั้นเราจะทำการสั่งให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด แล้วทำการบันทึกค่าของความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นผลต่างระหว่างคำสั่งความเร็วรอบและความเร็วรอบที่วัดจากเอนโค้ดเดอร์ ด้วยโปรแกรมของ SPiPlusMotion Controller

ตารางที่ 4.2 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมเมื่อทดสอบที่ความเร็วต่างกัน

แกน	ความเร็วเชิงมุม 30000 พัลส์ต่อวินาที		ความเร็วเชิงมุม 20000 พัลส์ต่อวินาที		ความคลาดเคลื่อนที่ 30000 เรเดียนต่อวินาที	ความคลาดเคลื่อนที่ 20000 เรเดียนต่อวินาที
	คำสั่ง (เรเดียนต่อวินาที)	ที่วัดได้ (เรเดียนต่อวินาที)	คำสั่ง (เรเดียนต่อวินาที)	ที่วัดได้ (เรเดียนต่อวินาที)		
1	0.295	0.294	0.197	0.196	0.0074	0.0060
2	0.235	0.244	0.184	0.237	0.0236	0.0210
3	0.377	0.433	0.251	0.417	0.0094	0.0084
4	0.377	1.202	0.251	1.187	0.0251	0.0151
5	0.377	0.381	0.251	0.376	0.0113	0.0109

จากการทดลองนี้สามารถวัดค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของแขนหุ่นยนต์แกนที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เมื่อตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 30000 พัลส์ต่อวินาทีได้คือ 0.0074, 0.0236, 0.0094, 0.0251 และ 0.0113 เรเดียนต่อวินาที ตามลำดับและ สามารถวัดค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของแขนหุ่นยนต์

แกนที่ 1,2,3,4 และ 5 เมื่อตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 20000 พัลส์ต่อวินาที ได้คือ 0.0060, 0.0210, 0.0084, 0.0151 และ 0.0109 เรเดียนต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 30000 พัลส์ต่อวินาที แขนหุ่นยนต์มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบ 20000 พัลส์ต่อวินาที แสดงว่าความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกนนั้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการทำงาน ยิ่งแขนหมุนด้วยความเร็วรอบมากเท่าไรค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่มากที่สุดก็จะมีค่ามากไปด้วย

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์และการหาความเร็วเชิงมุมจากคำสั่งของโปรแกรม SPiPlus Motion Controller เมื่อกำหนดคำสั่งความเร็วเชิงมุมเป็น 30000 พัลส์ต่อวินาที

ตารางที่ 4.3 นิยามของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วรอบ

$v$ = ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้	$v_c$ = ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง
$\theta$ = เรเดียน = มุมที่เคลื่อนที่ได้	$v_a$ = ความเร็วเชิงมุมตามที่กำหนด
$t$ = เวลา	$r_o$ = อัตราทดเกียร์

ในแกนที่ 1

$$\text{ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ : } v = \frac{\theta \times 2\pi}{t} = \frac{0.81 \times 2\pi}{17.35} = 0.294 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง : } v_c = \frac{v_a \times 2\pi}{4 \times N \times r_o} = \frac{30000 \times 2\pi}{4 \times 2048 \times 78} = 0.295 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

ในแกนที่ 2

$$\text{ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ : } v = \frac{\theta \times 2\pi}{t} = \frac{64.263 \times 2\pi}{4.58} = 0.244 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง : } v_c = \frac{v_a \times 2\pi}{4 \times N \times r_o} = \frac{30000 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 80} = 0.235 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

ในแกนที่ 3

$$\text{ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ : } v = \frac{\theta \times 2\pi}{t} = \frac{0.65 \times 2\pi}{9.44} = 0.433 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง : } v_c = \frac{v_a \times 2\pi}{4 \times N \times r_o} = \frac{30000 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.377 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

ในแกนที่ 4

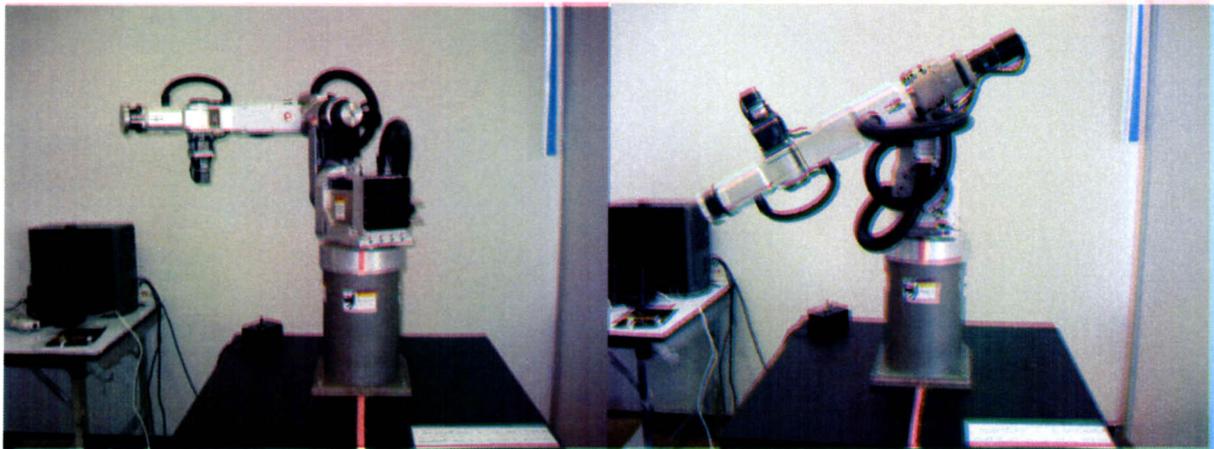
$$\text{ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ : } v = \frac{\theta \times 2\pi}{t} = \frac{0.72 \times 2\pi}{3.77} = 1.202 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง} : v_c = \frac{v_a \times 2\pi}{4 \times N \times r_o} = \frac{30000 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.377 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

ในแกนที่ 5

$$\text{ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้} : v = \frac{\theta \times 2\pi}{t} = \frac{0.46 \times 2\pi}{7.65} = 0.381 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุมตามคำสั่ง} : v_c = \frac{v_a \times 2\pi}{4 \times N \times r_o} = \frac{30000 \times 2\pi}{4 \times 2500 \times 50} = 0.377 \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$



รูปที่ 4.10 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ด้วยความเร็วรอบ 20000 พัลส์ ต่อวินาที (ซ้าย) และ 30000 พัลส์ ต่อวินาที (ขวา)

#### 4.4) การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยสมการทางจลศาสตร์โดยใช้ Jacobian

ในการคำนวณสมการทางจลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์เพื่อนำมาใช้ควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่สามารถกระทำได้โดยการแก้สมการ inverse kinematics โดยใช้เทคนิค Resolved Motion Rate Controller (RMRC) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคในการคำนวณหาองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อ อย่างอัตโนมัติ เมื่อกำหนดตำแหน่งและความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ต้องการ โดยเทคนิคนี้จะเป็นเทคนิคที่จะทำการคำนวณหลายๆครั้งจนกว่าข้อผิดพลาดของคำสั่งและผลที่คำนวณได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อย ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ความเร็วเชิงมุมของข้อต่อที่ 1 ถึง 6 มีค่าเป็น 0.098, 0.078, 0.295, 0.295, 0.295, 0.295 rad/s ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ระหว่างตำแหน่งที่สั่งงาน หรือตำแหน่งปลายแขนที่คำนวณได้จากเทคนิคนี้  $(X_d, Y_d, Z_d)$  กับ ตำแหน่งปลายแขนที่วัดได้จริง  $(X_m, Y_m, Z_m)$  นั้นแสดงในตารางที่ 4.4 สำหรับการทดสอบ 8 ตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ โดยให้นิยามของความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่เป็น

$$\text{error} = \sqrt{(X_d - X_m)^2 + (Y_d - Y_m)^2 + (Z_d - Z_m)^2}$$

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งที่วัดได้จริงกับตำแหน่งที่ต้องการหรือคำนวณได้จากเทคนิคทางจลศาสตร์นี้มีค่าน้อย โดยผู้วิจัยคาดว่าความคลาดเคลื่อนนั้นมาจากการวัดที่อาจมีความผิดพลาด เนื่องจากในการวัดตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์นั้นใช้ลูกดิ่งผูกติดกับกึ่งกลางของปลายแขนแล้วจึงใช้ไม้บรรทัดวัดเทียบกับฐานของแขนหุ่นยนต์

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งที่วัดได้จริง และ ตำแหน่งที่ต้องการหรือคำนวณได้จากเทคนิค RMRC ทางจลศาสตร์

ตำแหน่งที่ต้องการ (cm)			ตำแหน่งที่วัดได้จริง (cm)			ความคลาด เคลื่อน (cm)
$X_d$	$Y_d$	$Z_d$	$X_m$	$Y_m$	$Z_m$	
55	40	70	55.3	38.4	70.3	1.602
-55	40	70	-54.2	39.6	71.0	1.337
55	-40	70	54.3	-41.1	70.7	1.472
-55	-40	70	-54.6	-38.1	70.1	1.904
50	50	50	50.0	48.0	50.7	2.119
-50	50	50	-49.4	50.0	51.9	1.971
50	-50	50	49.3	-51.0	51.8	2.213
-50	-50	50	-49.9	-46.9	51.4	3.431

#### 4.5) การทดลองเพื่อทดสอบการวัดแรงกดและแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนบนเบาะตามแนวแกน x

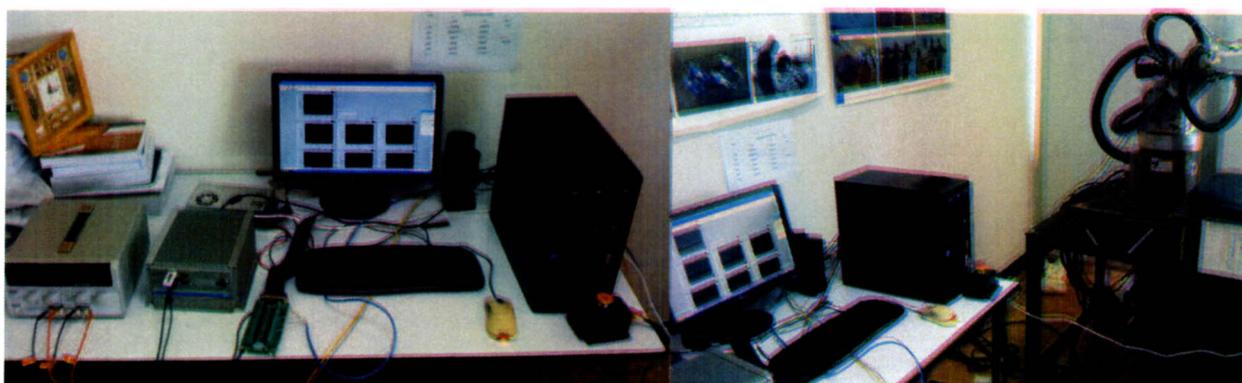
ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันในส่วนแรกจะต้องการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดแรงจาก Kyowa รุ่น LFX-A-1KN แบบ 6 แกนทางด้านความไวและความแม่นยำในการวัดแรงในแกน z เพียงอย่างเดียว โดยจะทำการทดลองกดปลายแขนหุ่นยนต์ที่ติดเข้ากับเซนเซอร์วัดแรงลงบนเบาะ 4 ระดับความลึกดังนี้

- ความลึกระดับที่ 1 ปลายแขนหุ่นยนต์ยังอยู่บนผิวเบาะไม่มีการกดใดๆ ให้เป็นจุดเริ่มต้นระยะ = 0 cm
- ความลึกระดับที่ 2 ปลายแขนหุ่นยนต์กดเบาะลงไป 0.8 cm เทียบกับความลึกที่ 1 แล้วรอ 5 วินาที
- ความลึกระดับที่ 3 ปลายแขนหุ่นยนต์กดเบาะลงไป 2.8 cm เทียบกับความลึกที่ 1 แล้วรอ 5 วินาที
- ความลึกระดับที่ 4 ปลายแขนหุ่นยนต์กดเบาะลงไป 4.5 cm เทียบกับความลึกที่ 1 แล้วรอ 5 วินาที

จากนั้นสั่งแขนหุ่นยนต์กลับไปยังความลึกระดับ 1 โดยทันทีโดยการทดลองนี้จะใช้โปรแกรม SPiiPlus MMI ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในส่วนที่สองนั้นจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดแรงในด้านความไวและความแม่นยำในการวัดแรงในแกน x,y,z และโมเมนต์รอบแกน x,y,z เมื่อบังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปบนเบาะพร้อมๆ กับกดเบาะไปด้วย



รูปที่ 4.11 การกำหนดแกน x, y, z ของเซนเซอร์วัดแรงที่ติดตั้งที่ปลายแขนของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.12 การเชื่อมต่อแขนหุ่นยนต์แบบ แกนผ่านสายอินเตอร์เน็ต และ เซนเซอร์วัดแรงเข้ากับคอมพิวเตอร์

ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อทำการทดสอบวัดแรงทั้งในสองส่วนนี้ จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1 ต่อสายอินเตอร์เน็ตจากตู้ควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบแกนกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างแขนหุ่นยนต์กับผู้ใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์ ทำการตั้งค่าเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์โดยมีค่าดังนี้ IP address: 10.0.0.101 และ Subnet mask: 255.255.255.0

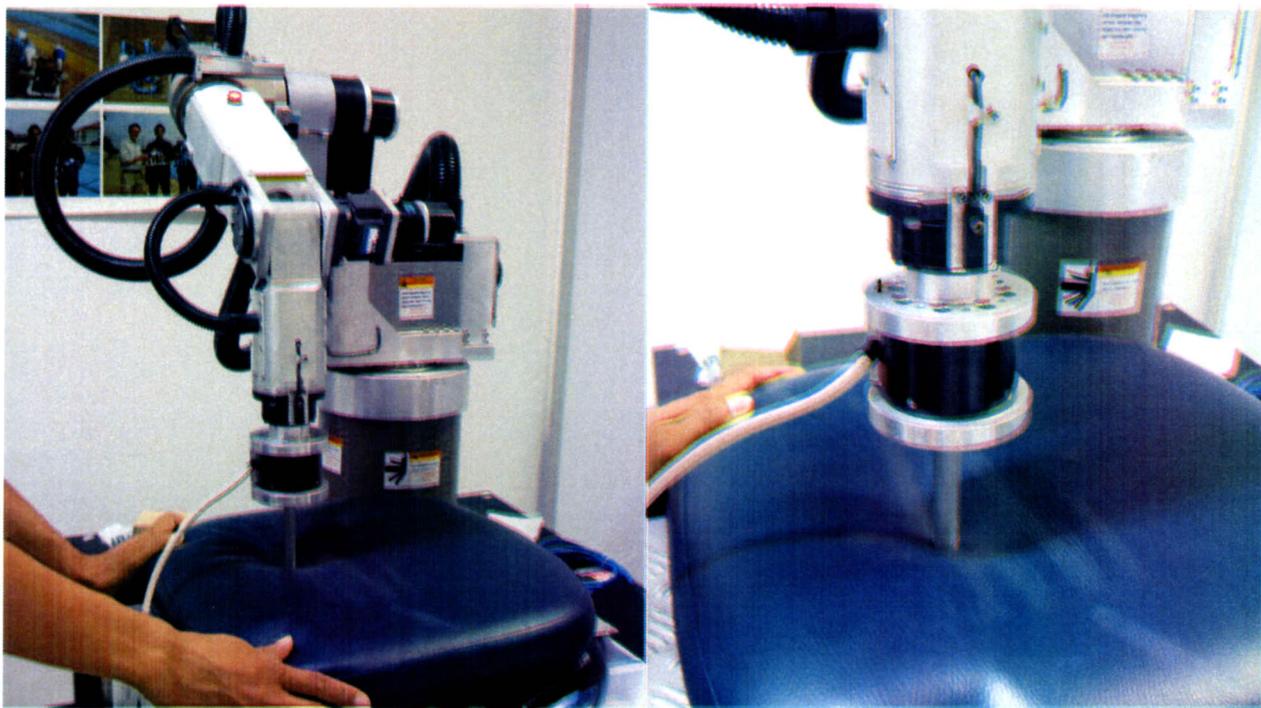
2 ติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงที่ปลายแขนหุ่นยนต์แล้วเชื่อมต่อสายสัญญาณผ่านคอนเน็กเตอร์ไปยังเคเบิลการ์ดที่ติดตั้งอยู่ในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดแรงในแนวแกนต่างๆ โดยใช้งานร่วมกับ โปรแกรม Labview

3 เตรียมแหล่งจ่ายไฟฟ้า 5 VDC เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับเซนเซอร์วัดแรง

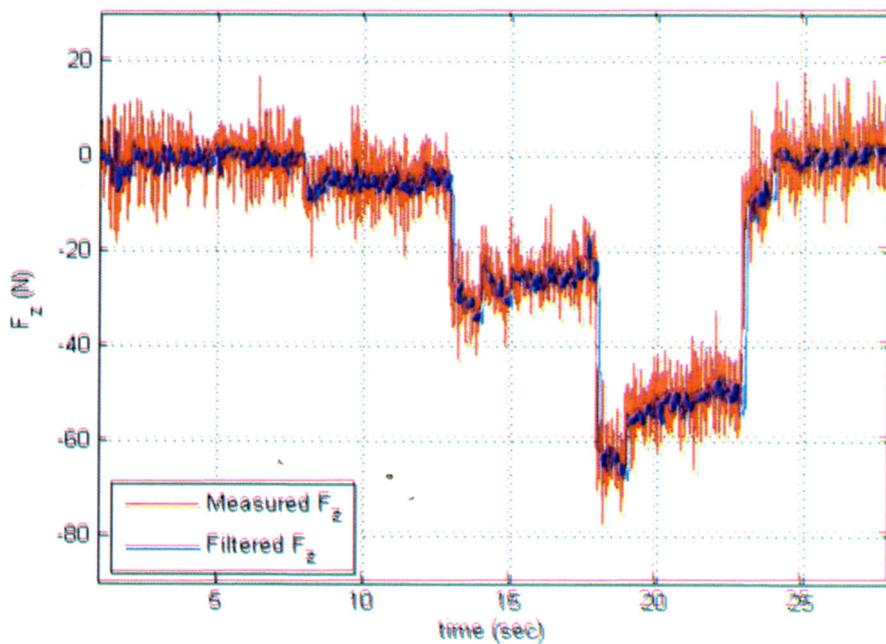
4 ทำการหุ้มฟอรัลยอลูมิเนียมที่คอนเน็กเตอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตู้ควบคุมและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่อยู่รอบข้าง

5 นำเบาะทดสอบมาวางยังตำแหน่งที่ต้องการทดลองโดยวางให้อยู่ในระนาบเดียวกับพื้น

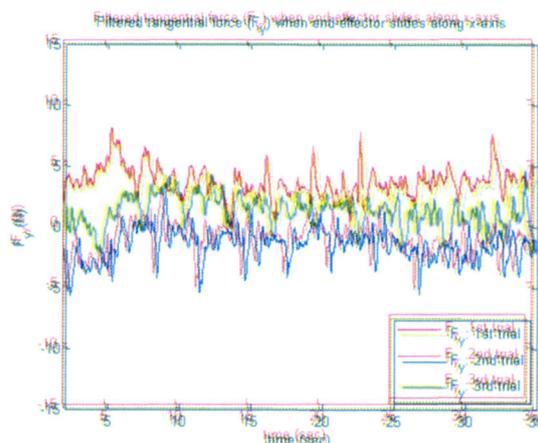
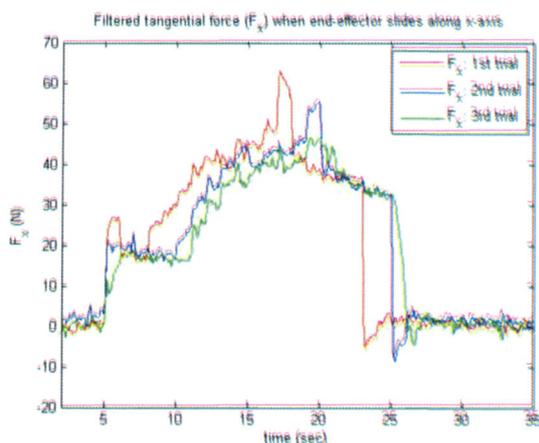
เมื่อทำการเชื่อมต่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็ทำการเก็บค่าตำแหน่งของแกนต่างๆของแขนหุ่นยนต์ที่จะเคลื่อนไปยังจุดที่ทำการทดสอบเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบจริง



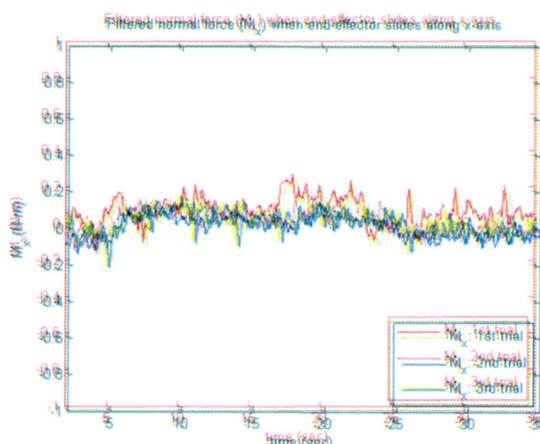
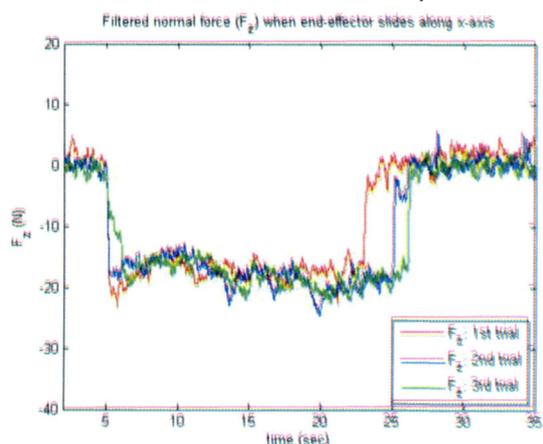
รูปที่ 4.13 การทดสอบการวัดแรงที่กระทำโดยแขนหุ่นยนต์เพื่อทดลองบนเบาะโดยมีการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง



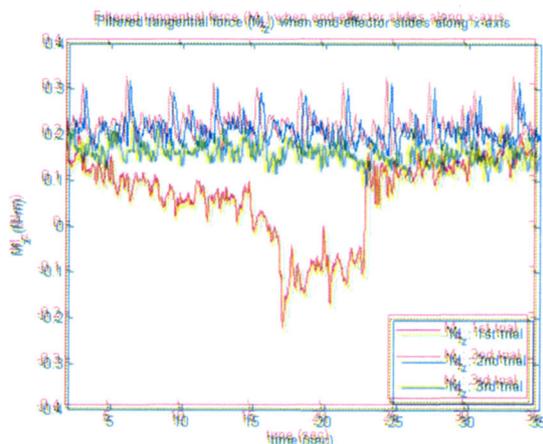
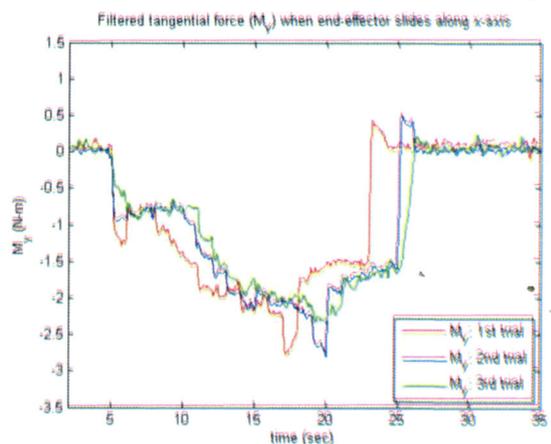
รูปที่ 4.14 แรงกดจากแขนหุ่นยนต์ ( $F_z$ ) ที่กระทำกับเบาะให้ยุบลงใน 3 ระดับความลึก (0.8, 2.8, 4.5) cm



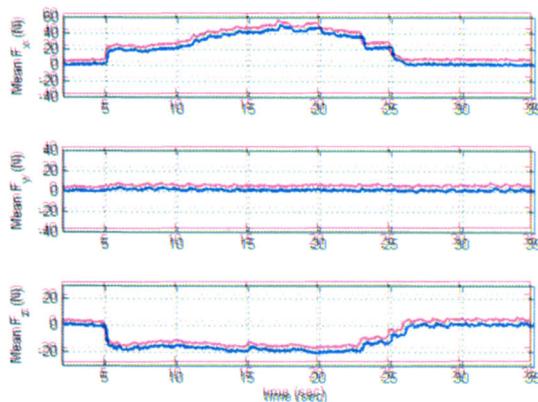
รูปที่ 4.15 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y(ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



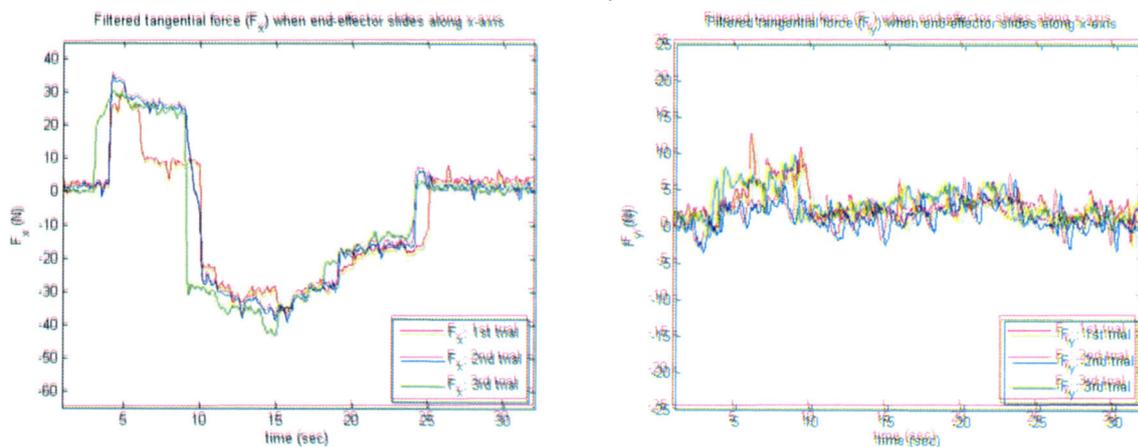
รูปที่ 4.16 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเบาะ (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



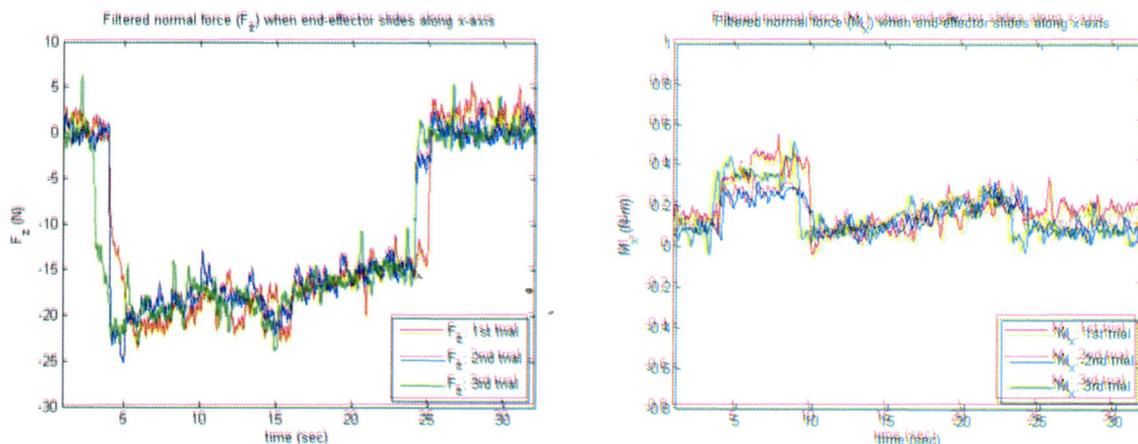
รูปที่ 4.17 โมเมนต์รอบแกน y(ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



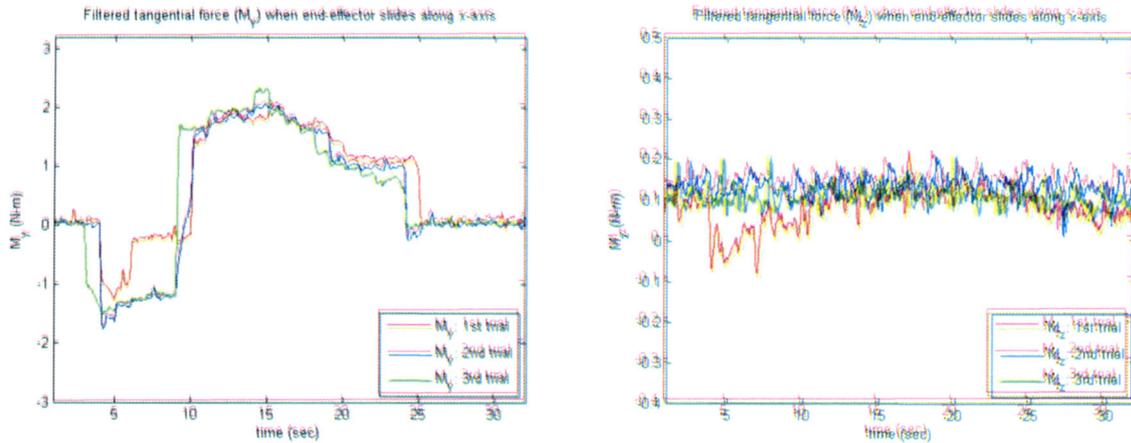
รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y (กลาง) และ z (ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



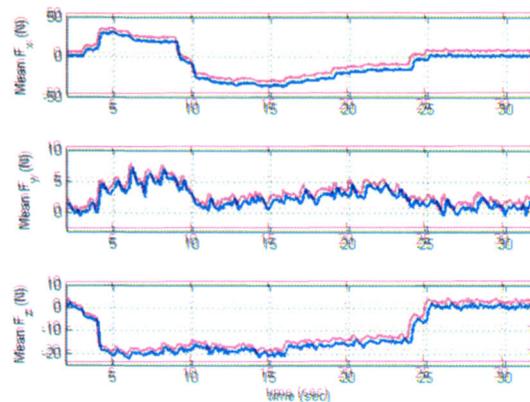
รูปที่ 4.19 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y (ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.20 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเบาะ (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x (ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.21 โมเมนต์รอบแกน y(ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y(กลาง) และ z(ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x

#### 4.5.1) การทดลองทดสอบการวัดแรงกด

การทดสอบวัดแรงกดเพื่อดูค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำกับวัตถุที่หยุดนิ่งโดยให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ลงไปกดวัตถุลงไปเป็นระยะต่างๆ โดยการทดสอบได้ใช้เบาะทดสอบ โดยมีการกดลงไปเป็น 3 ระดับในแต่ละระดับ จะมีการหยุดรอ 5 วินาที เพื่อดูว่าค่าแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ในแต่ละระดับ จาก รูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าขณะที่ออกแรงกดเบาะลงไปเป็นระยะ 0.8 cm เมื่อเทียบกับตำแหน่ง 0 cm ที่อยู่ที่ผิวเบาะ ให้เป็นตำแหน่งที่ 1 ค่าแรงจะอยู่ที่ -8 N และค่อนข้างคงที่ เมื่อออกแรงกดลงไปอีกเป็นระยะ 2.8 cm ให้เป็นตำแหน่งที่ 2 ค่าแรงช่วงแรกจะอยู่ที่ -28 N และค่อยๆ เปลี่ยนเป็น -24 N และเมื่อออกแรงกดตำแหน่งสุดท้ายเป็นระยะ 4.5 cm จากความลึกของผิวเบาะซึ่งให้เป็นตำแหน่งที่ 3 ค่าแรงที่วัดได้เริ่มแรกอยู่ที่ -63 N และเปลี่ยนเป็น -50 N

จากการทดสอบการวัดแรงกด ในรูป 4.14 จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์วัดแรงมีการตอบสนองต่อแรงที่กระทำได้ไวโดยมีการตั้งค่าอัตราการเก็บข้อมูลที่ 1 kHz และสามารถตอบสนองต่อแรงกระทำต่อปลายแขน

หุ่นยนต์ด้วยค่าแรงที่น้อยโดยค่าที่ดูจากรูปจะเห็นได้ว่าสามารถตอบสนองค่าแรงที่น้อยแค่เพียง 8 N ได้และสามารถตอบสนองต่อแรงที่น้อยถึง 5 N ได้โดยได้ทดสอบด้วยการนำวัตถุ มวล 0.5 kg มาวางบนเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนปลายแขนหุ่นยนต์ก็สามารถวัดได้อย่างถูกต้องเช่นกัน

เมื่อออกแรงกดลงไปทั้ง 3 ระดับความลึก โดยออกแรงกดในแต่ละตำแหน่ง ค่าแรงจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน โดยค่าแรงตำแหน่งที่ 1 มีค่าคงที่ตลอดเวลาไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกดไปไม่มากทำให้ไม่มีผลในการยุบตัวของเบาะ ส่วนค่าแรงที่ออกแรงกดตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ค่าแรงจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ตลอดเวลาส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับระยะที่กดลงไปโดยตำแหน่งที่กดลงไปเป็นระยะมากๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วค่อยๆเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จนถึงค่าคงที่ที่ค่าแรงค่าหนึ่ง โดยค่าแรงที่เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากเบาะทดสอบมีการยุบตัว จึงทำให้แรงกระทำกับเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงไป

ปัญหาและอุปสรรคในการทดลองการวัดแรงกด เนื่องจากเบาะมีการยุบตัวจึงทำให้ค่าแรงที่วัดในระดับที่กดลงไปในระดับที่ 2 และระดับที่ 3 จึงทำให้ค่าแรงที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยค่อยๆลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าใดค่าหนึ่งแล้วเริ่มคงที่เพราะเบาะหยุดการยุบตัว

#### 4.5.2) แรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนบนเบาะตามแนวแกน X

การทดสอบหาแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนเบาะตามแนวแกน X เพื่อต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงอย่างไรในขณะที่แขนเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง และในขณะที่แขนเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่

เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศบวก x

แรงเสียดทานที่วัดได้โดยดูจากรูปที่ 4.15 และค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานดังในรูปที่ 4.18 แรงเสียดทานในแนวแกน X ที่เกิดขึ้นขณะแขนหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเพิ่มขึ้น 20 N จากนั้นจะคงที่แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนไปถึงระยะหนึ่งแล้วจะค่อยๆลดลง และเมื่อแขนหุ่นยนต์หยุดเคลื่อนที่ค่าแรงเสียดทานจะมีค่าเป็น 0 N ส่วนค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y จะมีค่า 0 N ตลอดเวลาเนื่องจากแขนหุ่นยนต์ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ส่วนค่าแรงกระทำในแนวแกน Z หรือแนวตั้งฉากกับเบาะจะค่อนข้างคงที่โดยมีค่าประมาณ -18N ดังแสดงในรูปที่ 4.16

เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศลบ x

แรงเสียดทานที่วัดได้โดยดูจากรูปที่ 4.19 และค่าเฉลี่ยของแรงเสียดทานดังในรูปที่ 4.22 แรงเสียดทานในแนวแกน X ที่เกิดขึ้นขณะแขนหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเพิ่มขึ้นเป็น 30N จากรูปจะเห็นว่าที่เวลา 9 วินาทีแรงเสียดทานมีการลดลงอย่างทันทีทันใดแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีก ส่วนค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y จะมีค่าค่อนข้างคงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงบ้างบางช่วงเวลาส่วนค่าแรงกระทำในแนวแกน Z ค่อนข้างคงที่โดยมีค่าประมาณ -18N ดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากการทดสอบแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนเบาะตามแนวแกน X โดยมีอัตราการเก็บข้อมูลที่ 1 kHz ซึ่งใช้เด็คการ์ด(DAQ card) ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Labview ในการเก็บข้อมูล จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าความเร็วในการตอบสนองของเซ็นเซอร์วัดแรงมีความไวโดยดูได้จากค่าแรงเสียดทานในแนวแกน X และ ค่าแรงกดในแนวแกน Z ซึ่งจะเห็นว่าสามารถตอบสนองได้อย่างทันทีทัน โดยวัดค่าได้ 20 N และ -18 N ตามลำดับ โดยวัดได้ทันทีขณะที่แขนเริ่มเคลื่อนที่ และจะเห็นว่าค่าแรงในแนวแกน Y ของรูปที่ 4.18 มีค่า 0 N ส่วนรูปที่ 4.22 มีค่าเปลี่ยนแปลงและมีการแกว่งบ้างเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากแขนหุ่นยนต์มีการสั่นในขณะที่เคลื่อนที่

ปัญหาและอุปสรรค เนื่องจากแขนหุ่นยนต์มีการสั่นขณะที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง X ทำให้ค่าแรงที่วัดได้ในแนวแกน Y มีค่าไม่เท่ากับ 0 N และทำให้เส้นกราฟสั้นไปมา รวมทั้งยังสั่นในแนวแกน Z ด้วยทำให้กราฟในแนวแกน Z มีการสั่นค่อนข้างมาก โดยดูได้จากรูปที่ 4.22

#### 4.6) การทดลองเพื่อทดสอบการวัดแรงกดและแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนบนเนื้อไก่ตามแนวแกน x

ในการทดสอบหาแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนเนื้อไก่ตามแนวแกน x เพื่อต้องการทราบพฤติกรรมของแรงที่กระทำอันเกิดจากการเคลื่อนที่บนวัตถุประเภทเนื้อสัตว์ ขณะที่แขนเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง และเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่ด้วยการวัดแรงในแกน x,y,z เมื่อบังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปบนเนื้อไก่พร้อมกับกดเนื้อไก่ไปด้วยโดยในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อทำการทดสอบวัดแรง จะมีขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 เช่นเดียวกับหัวข้อการทดสอบที่ 4.5 และมีขั้นตอนที่ 5 ถึง ขั้นตอนที่ 7 เพิ่มเติมดังนี้

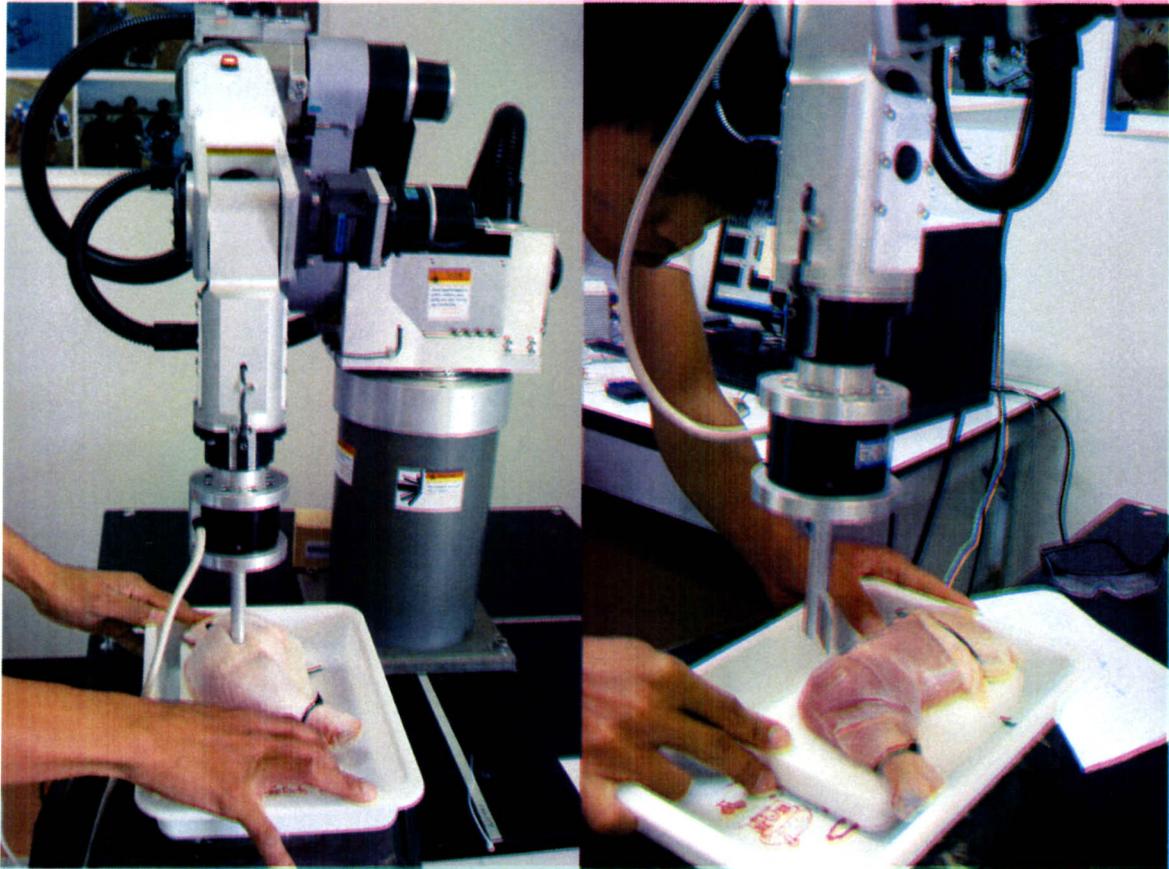
5 เตรียม โต๊ะและนำถุงพลาสติกมาปูรองเพื่อป้องกันการเลอะเทอะและเชื้อโรคแพร่กระจาย

6 นำเนื้อไก่มาวางยังตำแหน่งที่ต้องการทดลองโดยวางให้อยู่ในระนาบเดียวกับพื้นและนำสายรัดมารัดเนื้อไก่กับแท่นพลาสติกที่ใช้ทดสอบเพื่อป้องกันการเลื่อนไถลขณะแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่

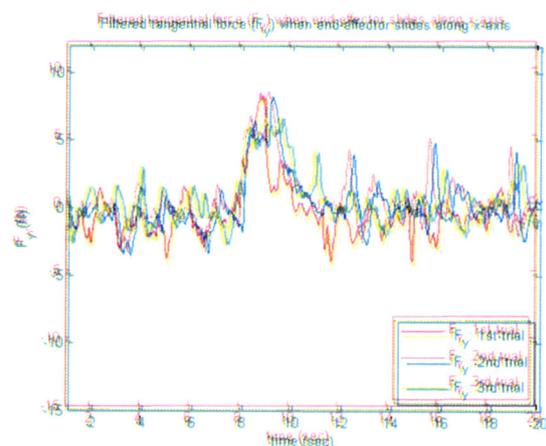
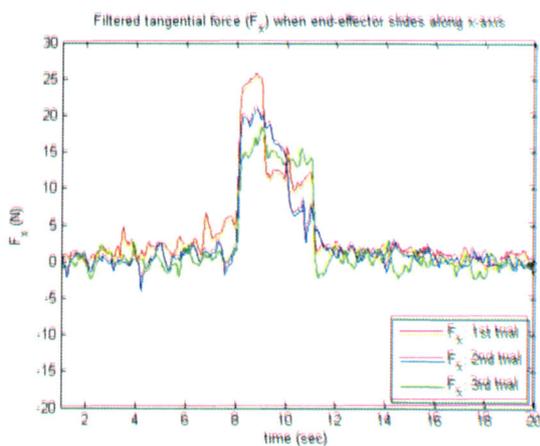
7 เมื่อทดสอบเสร็จแล้วทำความสะอาดพื้นที่และอุปกรณ์ในการทดสอบพร้อมทั้งทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่มาจากเนื้อไก่

เมื่อทำการเชื่อมต่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็ทำการเก็บค่าตำแหน่งของแกนต่างๆของแขนหุ่นยนต์ที่จะเคลื่อนไปยังจุดที่ทำการทดสอบเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบจริง โดยมีการทดสอบให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศทางบวก X และเคลื่อนที่ในทิศทางลบ X โดยนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวาดกราฟได้ดังรูปในหัวข้อที่ 4.6.1 และ หัวข้อที่ 4.6.2

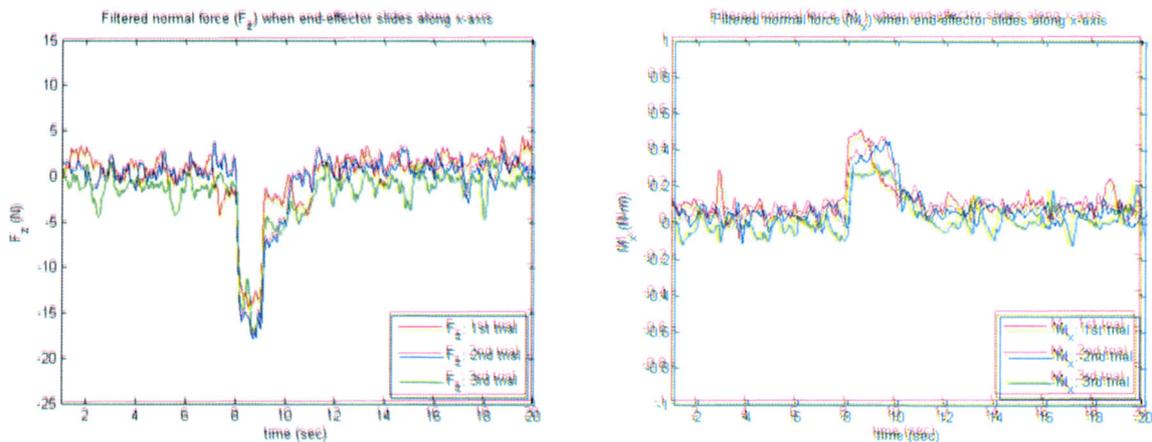
4.6.1) การทดลองเพื่อทดสอบการวัดแรงกดและแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนบนเนื้อไก่ตามแนวแกน X



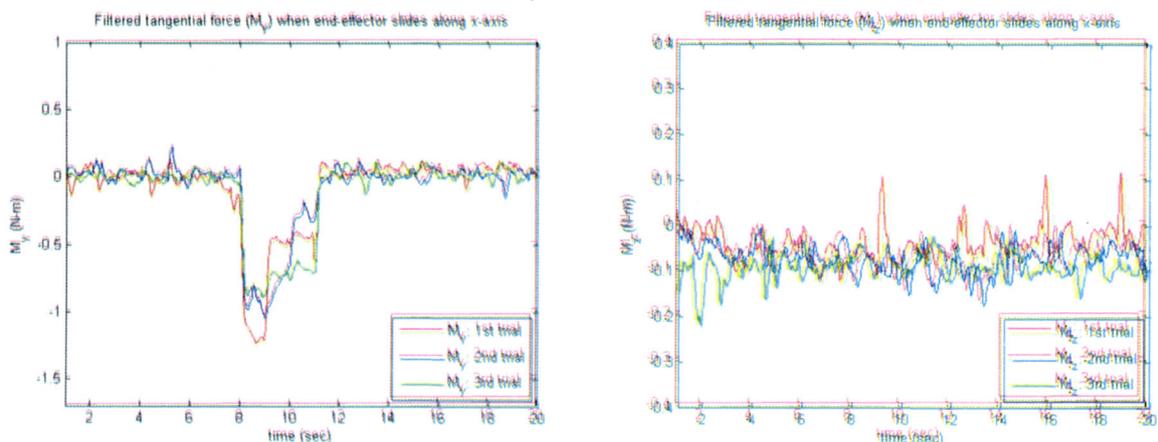
รูปที่ 4.23 การจำลองการผ่านเนื้อไก่ โดยจะวัดแรงและ โมเมนต์ที่กระทำจากปลายแขนหุ่นยนต์ในทั้ง 6 พิกัด



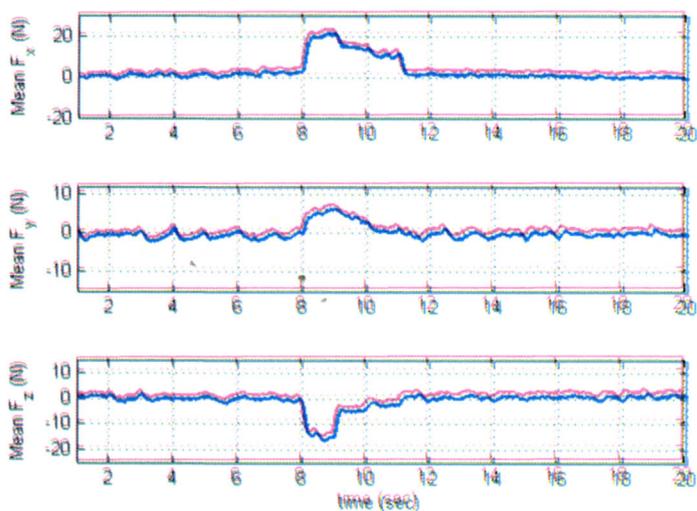
รูปที่ 4.24 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y(ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.25 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเบาะ (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



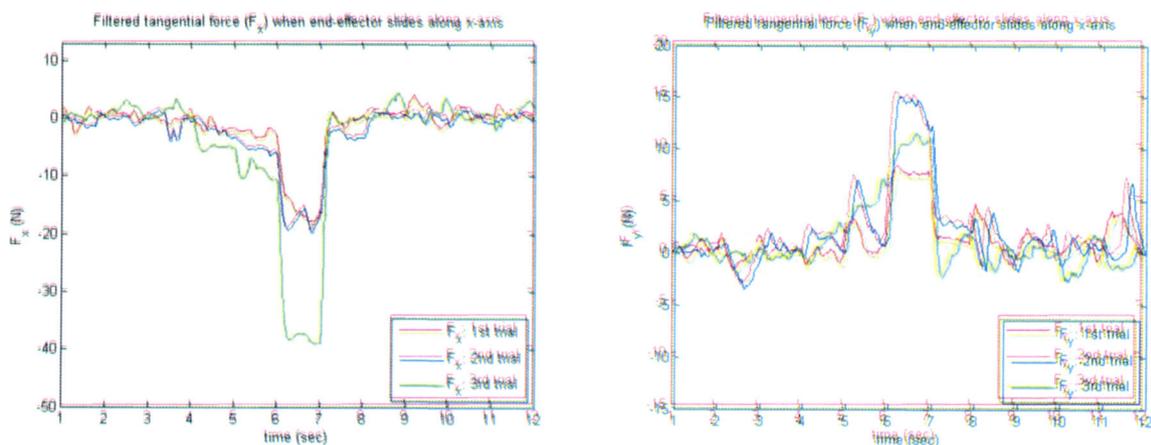
รูปที่ 4.26 โมเมนต์รอบแกน y(ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



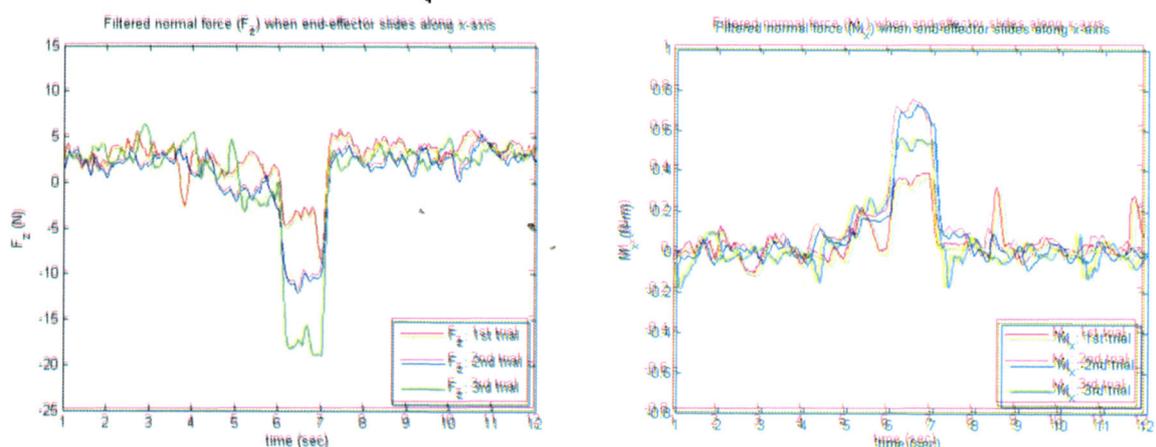
รูปที่ 4.27 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y(กลาง) และ z(ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x

### เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศบวก x

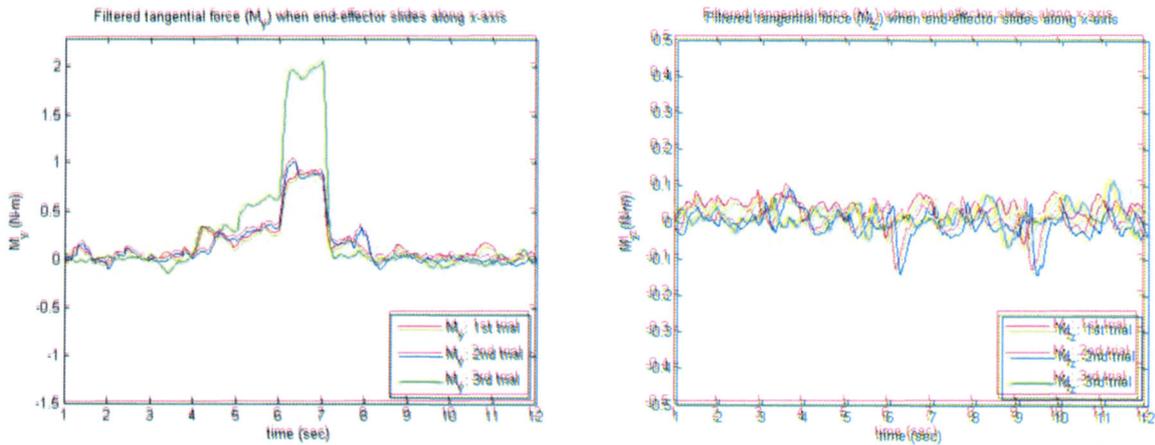
จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองสามครั้ง ค่าของแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y ซึ่งมีค่า 20 N และ 5 N ตามลำดับ เมื่อปลายแขนหุ่นยนต์กดลงบนเนื้อไก่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงเสียดทานของทั้งสองแกนมีค่าต่างกัน โดยค่าแรงในแนวแกน x มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าแรงในแนวแกน y ซึ่งที่จริงแล้วได้ทำการทดลองให้เคลื่อนที่ในแนวแกน x ดังนั้นจึงไม่น่าจะมีแรงในแนวแกน y แต่ค่าแรงในแนวแกน y ที่มีเกิดจากเมื่อแขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ทำให้เนื้อไก่ที่อยู่ด้านหน้าของปลายการเคลื่อนที่เกิดการดันตัวและมีการคลายตัวออกทางด้านข้างและประกอกับชิ้นเนื้อที่ใช้ในการทดสอบมีกระดูกและผิวของชิ้นเนื้อไก่ไม่ราบเรียบเสมอกันตลอด ซึ่งทั้งสององค์ประกอบนี้จึงทำให้เกิดแรงในแนวแกน y ส่วนค่าแรงกดในแนวแกน z มีค่า -14 N และคงที่ แล้วลดลงอย่างทันทีทันใด จากนั้นจะมีค่าคงที่อีก โดยการลดลงอย่างทันทีทันใดเกิดเนื่องมาจากผิวของเนื้อไก่ที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านมีระนาบที่ไม่ราบเรียบ



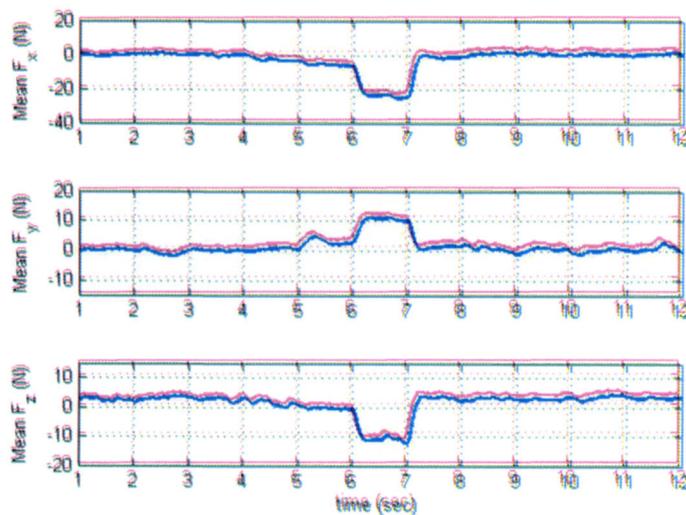
รูปที่ 4.28 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y(ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศลบ x



รูปที่ 4.29 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเบาะ (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศลบ x



รูปที่ 4.30 โมเมนต์รอบแกน y (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z (ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศลบ x



รูปที่ 4.31 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y (กลาง) และ z (ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเบาะที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศลบ x

#### เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศลบ x

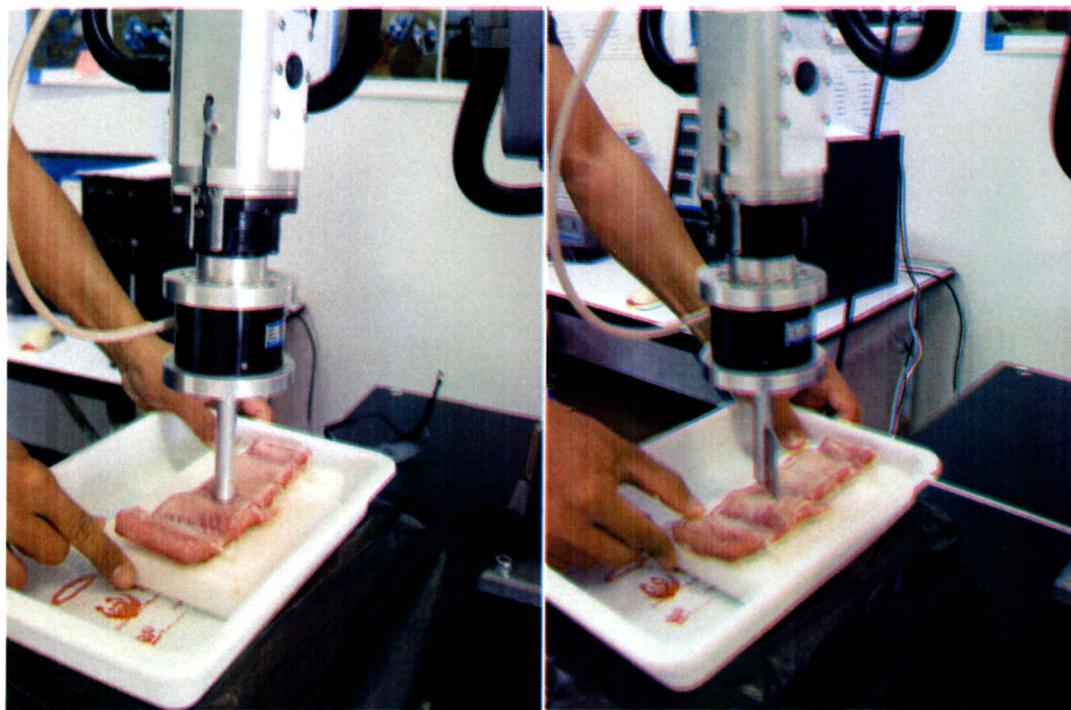
จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองสามครั้ง ค่าของแรงเสียดทานในแนวแกน x ค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y และค่าแรงกดในแนวแกน z ที่ได้จากการทดสอบมีเพิ่มขึ้นทีละนิดจากวินาทีที่ 4 ถึง วินาทีที่ 6 อันเนื่องมาจากเนื้อไก่มีผิวที่ไม่ราบเรียบ และจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยมีค่าแรงในแกน x, y และ z ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดแรงมีค่าเป็น -23 N, 11 N และ -11 N ตามลำดับ และจะคงที่ในช่วงเวลาวินาทีที่ 6 ถึง วินาทีที่ 7 โดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงเสียดทานในแนวแกน x มีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y โดยค่าแรงในแนวแกน Y ของการเคลื่อนที่ทั้งสองที่ทางต่างกันไม่มาก (ต่างกันประมาณ 3 N) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของการเคลื่อนที่ในทิศบวก x ที่มีค่าเป็น 4 เท่ากล่าวได้ว่าค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับแรงเสียดทานในแนวแกน x ว่าเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดหรือไม่ หากเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดจะมีผลให้ค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y จะมีค่าน้อย แต่

หากมีการเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ก่อนแล้วค่อยเกิดอย่างทันทีทันใดจะทำให้แรงเสียดทานในแนวแกน Y จะมีค่ามาก

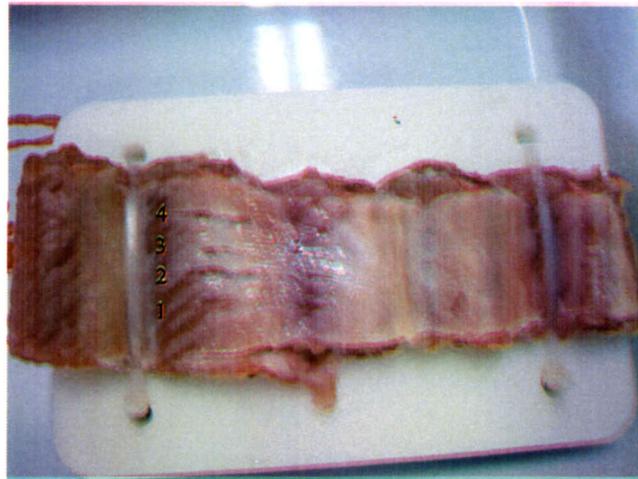
จากการทดสอบแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนเนื้อไก่ตามแนวแกน X ในทิศบวก และในทิศลบ โดยมีอัตราการเก็บข้อมูลที่ 1 kHz ซึ่งใช้เด็คการ์ด (DAQ card) ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ โดยทำงานร่วมกับ โปรแกรม Labview ในการเก็บข้อมูล จากรูป 4.27 และรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y มีค่าสัมพันธ์กับค่าแรงเสียดทานในแนวแกน X โดยหากค่าแรงเสียดทานในแนวแกน x เกิดขึ้นมากอย่างทันทีทันใดจะทำให้ค่าแรงเสียดทานในแนวแกน Y มีค่าน้อย และหากค่าแรงเสียดทานในแนวแกน X เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ก่อนแล้วค่อยๆ แล้วจากนั้นจึงเกิดอย่างทันทีทันใดจะทำให้แรงเสียดทานในแนวแกน Y มีค่ามาก ซึ่งสาเหตุข้างต้นเกิดจาก พฤติกรรมการดันตัวและคลายตัวของเนื้อไก่ ในขณะที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ลากผ่าน โดยการดันตัวจะเกิดด้านหน้าของการเคลื่อนที่ (คือแกน X ) และ ค่ายตัวออกด้านหลัง (คือแกน Y )

ปัญหาและอุปสรรคเนื่องจากชิ้นเนื้อไก่ที่ใช้ทดสอบมีกระดูกทำให้ค่าแรงในแนวแกนต่างๆ บางขณะมีการกระโดดเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักเนื่องจากกระดูกช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับเนื้อไก่ โดยดูได้จากรูปที่ 4.31 และพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบเสมอลดลดระยะทางที่ใช้ในการทดสอบจึงทำให้ค่าแรงในแนวแกน Z บางช่วงมีการกระโดดเล็กน้อย (ประมาณ 2 N) โดยดูได้จากรูปที่ 4.27 และ 4.31

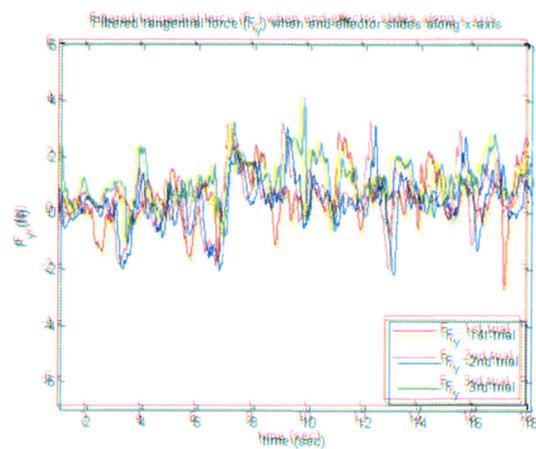
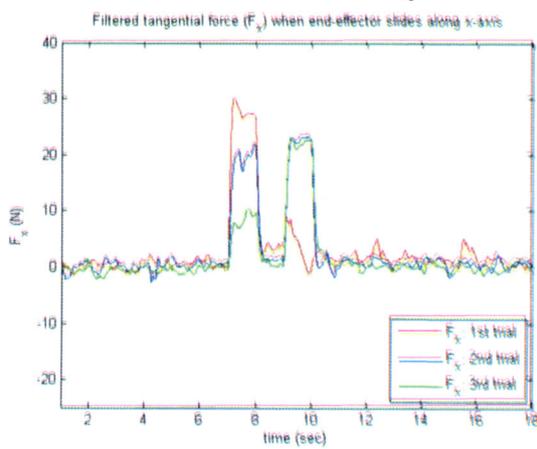
#### 4.6.2) การทดลองเพื่อทดสอบการวัดแรงกดและแรงเสียดทานเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนบนเนื้อหมูชนิดซี่โครงตามแนวแกน X



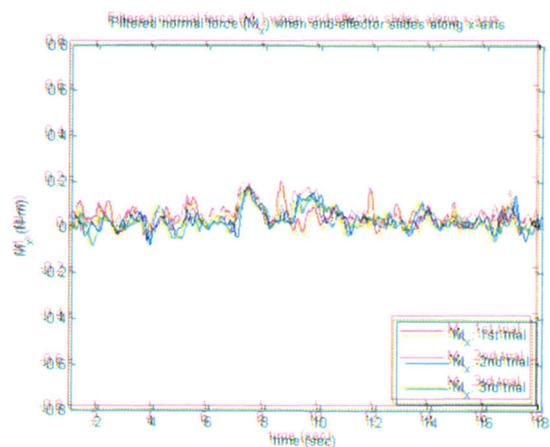
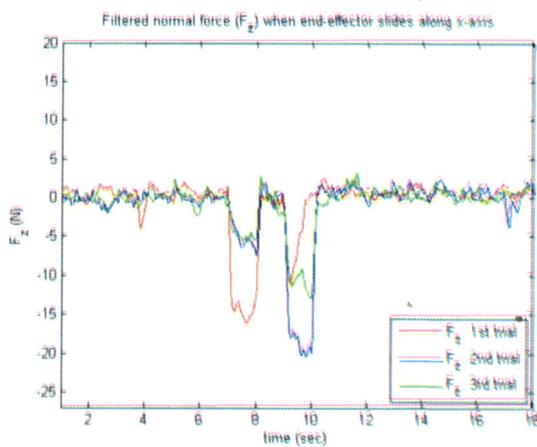
รูปที่ 4.32 การจำลองการกดและการผ่าเนื้อหมู โดยจะวัดแรงและ โมเมนต์ที่กระทำจากปลายแขนหุ่นยนต์ใน ทั้ง 6 พิกัด



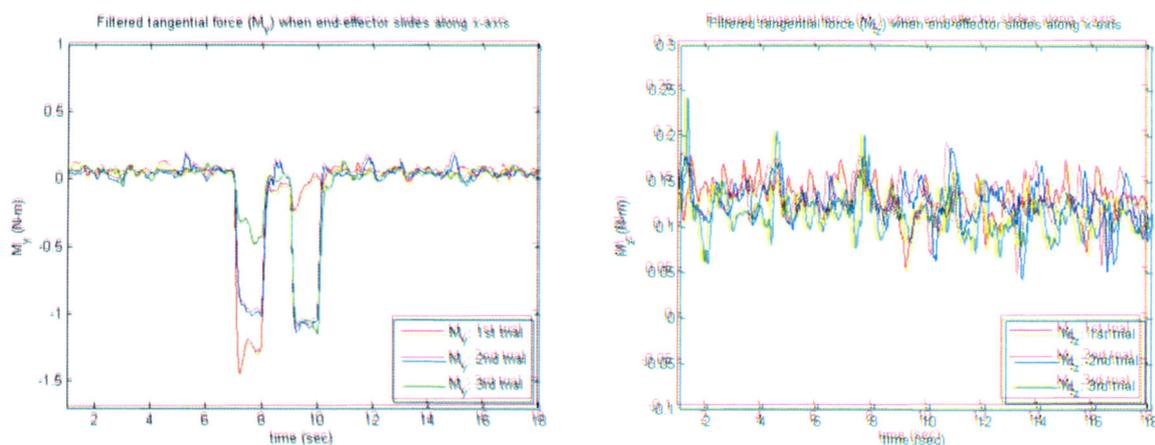
รูปที่ 4.33 เนื้อหมูที่โดนผ่า 4 ครั้ง



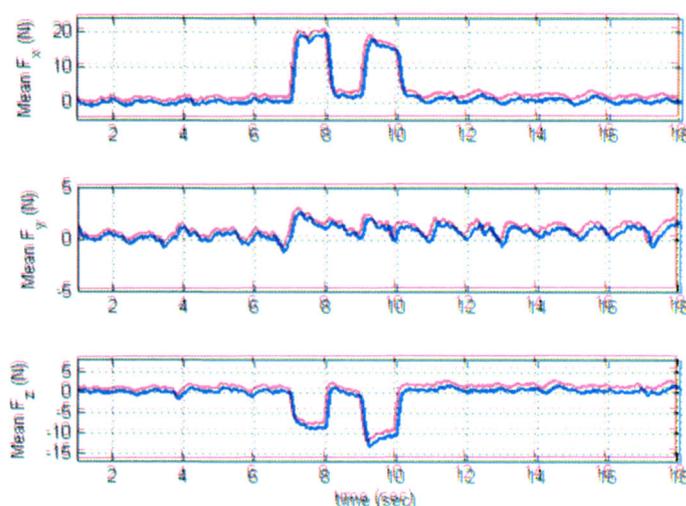
รูปที่ 4.34 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y(ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเนื้อหมูที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.35 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเนื้อหมู (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x



รูปที่ 4.36 โมเมนต์รอบแกน y(ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z(ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x

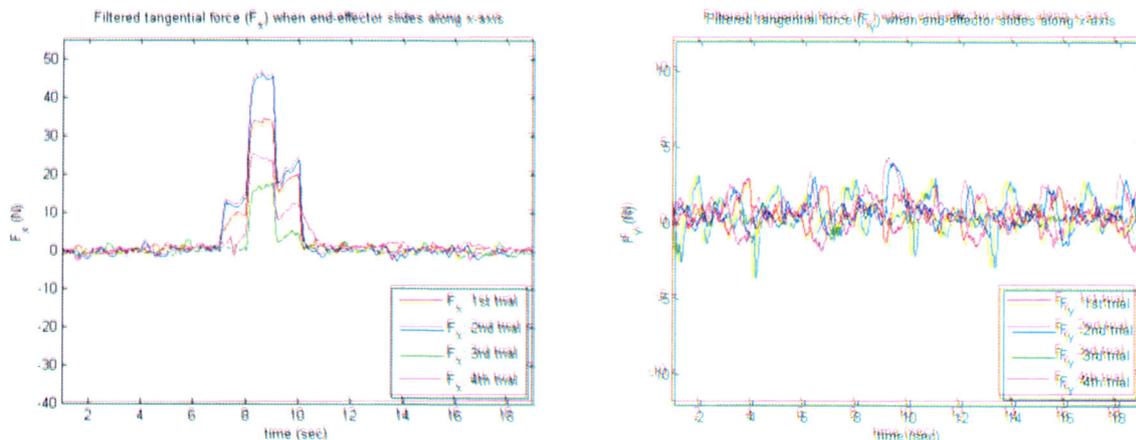


รูปที่ 4.37 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y(กลาง) และ z(ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเนื้อหุ้มที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง x

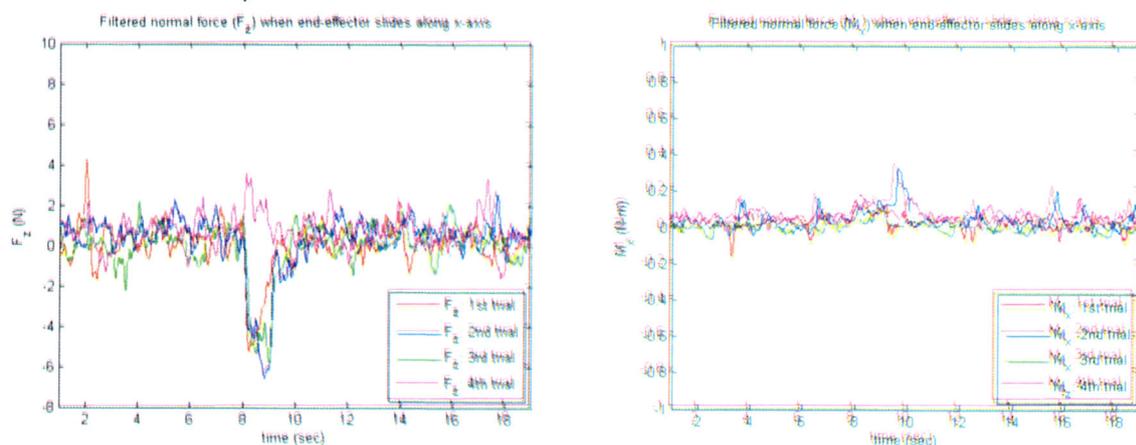
เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศทาง x โดยไม่มีการติดใบมีดที่ปลายแขน

จากรูปที่ 4.33 เป็นรูปที่ทดสอบโดยมีการติดใบมีดที่ปลายแขน จะเห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนตามรอยใบมีดได้อย่างชัดเจน ซึ่งหากนำมาพิจารณาประกอบกับรูป 4.37 จะเห็นได้ว่าค่าแรงเสียดทานในแกน X และค่าแรงกดในแกน Z มีความสัมพันธ์กัน โดยค่าแรงที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดในเวลาวินาทีที่ 7 มีค่า 18 N และ 8 N ตามลำดับจากนั้นจะคงที่อันเนื่องมาจากเป็นแรงที่ได้เกิดจากการกดลงบนกระดูกซี่โครงหมู แล้วตกลงอย่างทันทีทันใดเหลือแค่ 2 N และ 1 N ตามลำดับ โดยค่าแรงนี้เกิดจากแรงกดลงบนเนื้อหมูซึ่งมีค่าน้อยมาก จากนั้นประมาณวินาทีที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่าแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเพราะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อหมูส่วนกระดูกซี่โครงอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถึงแม้เราทำการทดลองโดยการลากแขนหุ่นยนต์บนชิ้นเนื้อที่มีกระดูกเสริมอยู่ด้านใต้ แม้ว่าระนาบการเคลื่อนที่จะเรียบแต่เมื่อภายในเนื้อหมูมีกระดูกเสริมอยู่ ก็ทำให้แขนหุ่นยนต์ออกแรงกระทำต่างกันทั้งๆที่เคลื่อนที่บนระนาบที่กำหนด และเมื่อ

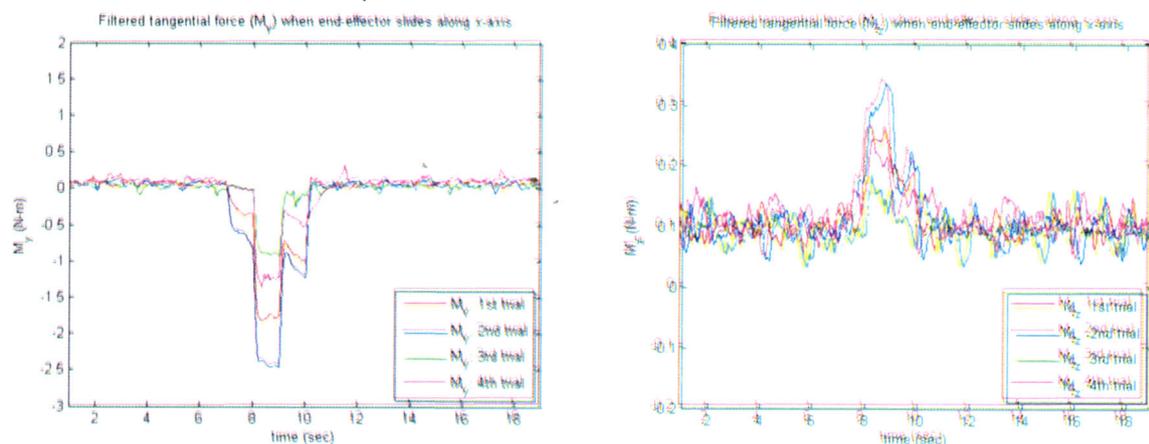
พิจารณาแรงในแนวแกน Y จะเห็นว่ามามีค่า 0 N ในช่วงแรกและมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกระดูกซี่โครง โดยค่าแรงที่วัดได้ประมาณ 1 N อันเกิดเนื่องมาจากการดันตัวของเนื้อหุ้มไปฝั่งใดฝั่งหนึ่ง



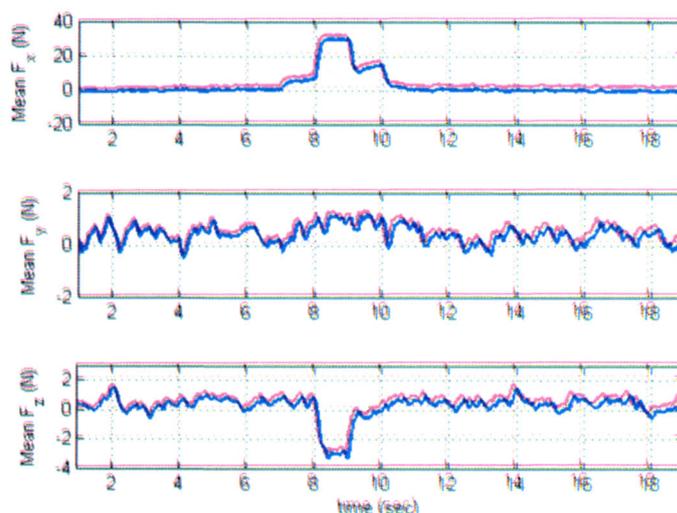
รูปที่ 4.38 แรงในแนวแกน x (ซ้าย) และ y (ขวา) หรือ แรงในแนวสัมผัสกับเนื้อหุ้มที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และมีการตีใบมีดที่ปลายแขน



รูปที่ 4.39 แรงในแนวแกน z หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับเนื้อไก่ (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน x (ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และมีการตีใบมีดที่ปลายแขน



รูปที่ 4.40 โมเมนต์รอบแกน y (ซ้าย) และ โมเมนต์รอบแกน z (ขวา) ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และมีการตีใบมีดที่ปลายแขน



รูปที่ 4.41 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวแกน x (บน) และ y (กลาง) และ z (ล่าง) หรือ แรงในแนวสัมผัสและตั้งฉากกับเนื้อไก่ที่ออกแรงกระทำโดยแขนหุ่นยนต์ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศบวก x และมีการติดใบมีดที่ปลายแขน

#### เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศบวก x และมีการติดใบมีดที่ปลายแขน

การทดสอบนี้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบที่แล้วแต่มีการติดใบมีดที่ปลายแขนหุ่นยนต์ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.39 ค่าแรงในแนวแกน Z จะมีค่าแรง  $F_{z4} = 0$  N คงที่ตลอดซึ่งเป็นเส้นกราฟที่ต่างจากกราฟการทดสอบครั้งอื่นๆอีก 3 ครั้ง หากนำมาพิจารณาร่วมกับรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่ารอยการตัดเนื้อหมูของครั้งที่สลักแต่ปลายใบมีดไม่ได้โดนกระดูกซี่โครงทำให้ไม่มีการกระโดดของค่าแรงในแนวแกน Z ในการตัดเนื้อหมูครั้งที่สี่ ต่อมาจะพิจารณาแรงในแนวแกน X และแรงในแนวแกน Y จากรูปที่ 4.41 และ รูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าเมื่อเราติดใบมีดแล้ว แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรูปที่ 4.41 มีการเพิ่มขึ้นของแรงแค่เพียงครั้งเดียว ซึ่งต่างกับรูปที่ 4.37 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของแรงสองครั้ง เกิดเนื่องมาจากเมื่อใบมีดกดตัดชิ้นเนื้อลงไปแล้ว หากปลายใบมีดไม่ปะทะกับกระดูกซี่โครงก็จะไม่มีแรงในแนวแกน Z และแกน X ที่เกิดจากการช่วยเสริมแรงของกระดูกซี่โครง แต่จะมีแรงในแนวแกน X เนื่องมาจากแรงต้านจากชิ้นเนื้อหน้าใบมีด โดยเมื่อพิจารณาค่าแรงจากการปะทะของใบมีดกับกระดูกซี่โครงในแนวแกน X และแรงในแนวแกน Z จะมีค่า 29 N และ -3 N ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแรงในแนวแกน Y จะมีค่าแกว่งไปมาในช่วง 0 N ถึง 0.5N โดยค่าที่ได้ขึ้นเนื่องมาจากการติดใบมีดที่ไม่ได้ขนานกับระนาบ XZ ของเซนเซอร์วัดแรง

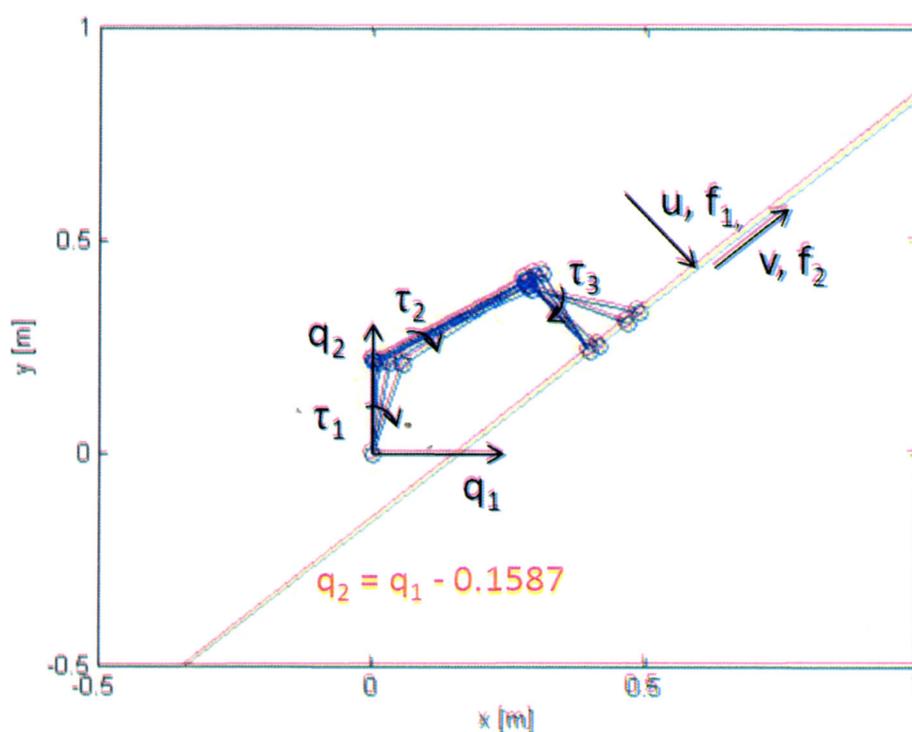
จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่กดซี่โครงหมูในแนวระนาบ จะสามารถวัดค่าแรงในแนวแกน X และค่าแรงในแนวแกน Z ได้อย่างชัดเจนแต่นำใบมีดมาติดที่ปลายแขนหุ่นยนต์ก็จะทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงในแนวแกน Z ได้อย่างชัดเจนเพราะแรงกดจากปลายใบมีดกับเนื้อหมูมีค่าน้อยมากหรือกล่าวได้ว่าเมื่อปลายใบมีดจะตัดเนื้อหมูทันทีเมื่อมีการสัมผัส เซ็นเซอร์วัดแรงของ Kyowa รุ่น LFX-A-1KN แบบ 6 แกน นั้นมีความละเอียดไม่พอในการวัดแรงในแนวแกน Z ที่กระทำต่อปลายใบมีด และจะเห็นว่าค่าแรงที่เกิดจากชิ้นเนื้อออกแรงต้านด้านหน้าใบมีดมีค่า 12 N โดยดูได้จากรูปที่ 4.41 ที่ช่วงเวลาวินาทีที่ 9 ถึง วินาทีที่ 10 และจากการทดลองยังทำให้ทราบว่าเมื่อปลายแขนหุ่นยนต์

เคลื่อนที่บนชิ้นเนื้อที่มีกระดูกเสริมอยู่ได้ได้โดยการเคลื่อนที่ผ่านในแนวระดับหากเคลื่อนที่ผ่านจุดที่มีกระดูกเสริมอยู่จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์ออกแรงกระทำมากกว่าจุดที่ไม่มีกระดูก

ปัญหาและอุปสรรคจากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่ามีค่าแรงในแนวแกน Y ที่มีค่าแกว่งไปมาในช่วง 0N ถึง 0.5 N การแกว่งไปมาของกราฟเกิดเนื่องมาจากเซ็นเซอร์วัดแรงที่ใช้ไม่สามารถวัดแรงในช่วงค่าที่ต่ำๆได้ และแรงที่เกิดขึ้นเกิดเนื่องมาจากการติดใบมีดที่ระนาบใบมีดไม่ขนานกับระนาบ XZ

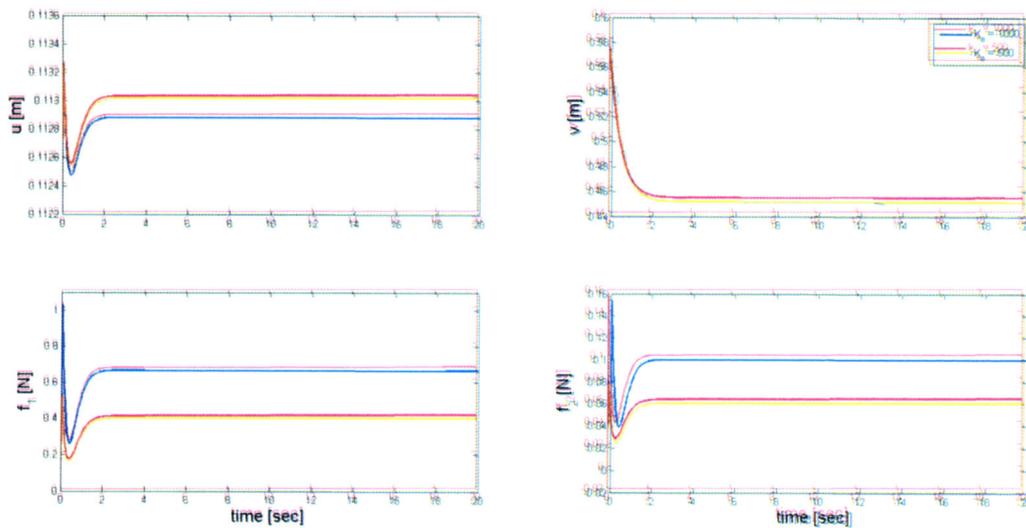
#### 4.7) การจำลองการควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

ในการควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปพร้อมๆกัน โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ impedance ที่อธิบายในหัวข้อ 2.8 โดยจากการทดลองที่ 4.6 จะสามารถสังเกตได้ว่าการทดลองการฝ่าเนื้อในแนวเส้นตรงด้วยแขนหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นนี้จะทำการขยับแขนหุ่นยนต์แค่เพียงสามแกนเท่านั้น คือ แกนที่ 2, 3 และ s เท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองการควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โดยพิจารณาแค่เพียงสามแกนนี้ให้เคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45 องศาที่กำหนด คือ ระนาบ  $u, v$  ในสองมิติ หรือ ที่อธิบายในพิกัดของแขนหุ่นยนต์ได้โดย  $q_2 = q_1 - 0.1587$  ดังแสดงในรูปที่ 4.42 นอกจากนั้นแล้วการจำลองการควบคุมนี้ยังต้องการให้มีแรงกดจากปลายแขนหุ่นยนต์ไปยังระนาบ ( $f_1$ ) โดยต้องมีแรง  $f_1$  ที่คงที่ขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของผิวระนาบที่สัมผัส ( $k_e$ ) โดยที่อินพุตที่จะป้อนให้กับแขนกลหรือที่ได้จากระบบควบคุมนี้จะเป็นแรงบิดของแต่ละข้อต่อ  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  ค่า  $K_p$  และ  $K_v$  ของระบบควบคุมนี้ถูกกำหนดให้เท่ากับ diagonal matrix ที่มีค่าเท่ากับ 2000 และ 1000 ตามลำดับ และ สมการๆเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้จากหัวข้อ 3.6

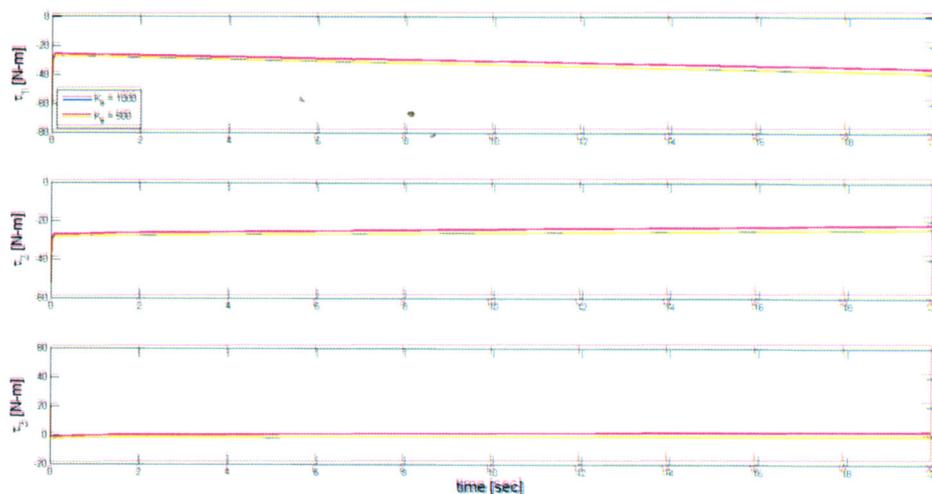


รูปที่ 4.42 การตั้งพิกัดของระนาบการเคลื่อนที่ ( $u, v$ ) และแนวแรง ( $f_1, f_2$ ) ของแขนหุ่นยนต์สามแกน ที่ควบคุมโดยการควบคุมแรงและการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน

ในแบบจำลองนี้จะใช้ค่า  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_5$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_5$  ที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 3.2.1 และ กำหนดให้แขนหุ่นยนต์เริ่มต้นการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $(u,v) = (0.1122, 0.5781)$  m ไปยังตำแหน่ง  $(u,v) = (0.1132, 0.4500)$  m และ แรงเสียดทานที่ผิวเป็น 0.2 คูณด้วยแรงกด และ กำหนดให้ความยืดหยุ่นของผิว ( $K_e$ ) เท่ากับ 1000 N-m หรือ ต้องการแรงกด 1 N และ 500 N/m หรือต้องการแรงกด 0.5 N จากผลการทดลองในรูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมแบบ impedance สามารถควบคุมให้แขนกลแบบสามแกนนี้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง โดยที่ยังมีแรงกดกับผิวทุกขณะแต่มีค่าขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของผิว เมื่อ  $K_e = 1000$  N-m จะได้  $f_1 = 0.667$  N และ เมื่อ  $K_e = 500$  N-m จะได้  $f_1 = 0.400$  N ซึ่งเป็นค่าที่ละเอียดมาก และ แสดงว่าการควบคุมนี้ไม่สามารถควบคุมแรงกดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากสมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นแบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก แล้ว ระบบควบคุมนี้จะมีค่าผิดพลาดในช่วง steady state เพราะว่าไม่มีตัวควบคุมแบบ integral ในรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นถึงแรงบิดที่จะต้องกระทำโดยมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถกระทำได้ในแขนหุ่นยนต์จริงที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.43 การเคลื่อนที่ของปลานแขนหุ่นยนต์บนระนาบ  $(u,v)$  และ แรงกด ( $f_1$ ) และ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิว ( $f_2$ ) เมื่อควบคุมด้วยเทคนิคแบบ impedance



รูปที่ 4.44 แรงบิดที่กระทำโดยมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อ