

กระบวนการออกแบบอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงสำหรับหุ่นยนต์ที่มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุด



นายตวรรษวิทย์ วงศ์ภักดีวัฒนกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1163-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SYSTEMATIC DESIGN PROCEDURE FOR OPTIMUM PERFORMANCE
OF ROBOT FORCE SENSORS

Mr. Traiwit Wong-aphiwatthanakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1163-6

ศรัยวิทย์ วงศ์ภักดีพัฒนกุล : กระบวนการออกแบบอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง
สำหรับหุ่นยนต์ที่มีสมรรถนะเหมาะสมที่สุด. (A SYSTEMATIC DESIGN PROCEDURE FOR
OPTIMUM PERFORMANCE OF ROBOT FORCE SENSORS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์
แสงวีระพันธุ์ศิริ, 159 หน้า. ISBN 974-03-1163-6.

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ 6 องศาอิสระสำหรับ
หุ่นยนต์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อให้ได้
โครงสร้างที่เหมาะสม มีค่าคอนดิชันนัมเบอร์เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิ
ภาพของโครงสร้าง นอกจากนี้ความถี่ธรรมชาติและความแข็งแรงของโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงก็
เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงด้วยในการออกแบบ

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอุปกรณ์
ตรวจรู้แรงตัวเก่า โดยมีค่าคอนดิชันนัมเบอร์เท่ากับ 1.47 สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวใหม่ (Sensor III)
เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวเก่า (Sensor II) ซึ่งมีค่า 7.03

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา.....2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170309721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FORCE SENSOR / 6-AXIS

TRAIWIT WONG-APHIWATTHANAKUL : A SYSTEMATIC DESIGN PROCEDURE FOR OPTIMUM PERFORMANCE OF ROBOT FORCE SENSORS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 159 pp. ISBN 974-03-1163-6.

The main objective of this research is to design a 6 degree-of-freedom force sensor for robot applications. The finite element method is used as the design and analysis tool to help for obtaining a suitable structure. The Condition number is an important parameter used for comparing the structure performance. Other factors, natural frequency and stiffness of the sensor structure, also play the importance role for designing the force sensor.

From the experimental result, it is shown that the new force sensor developed in this work has better performance than the previous developed sensor. The condition number is 1.47 for the new sensor (Sensor III) comparing to the 7.03 of the previous sensor (Sensor II).



Department.....Mechanical Engineering.....

Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering.....

Advisor's signature.....

Academic year.....2001.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ท่านได้สละเวลาให้คำแนะนำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มา โดยตลอด ขอขอบคุณคุณ ทวี งามวิไลกร เป็นพิเศษที่ได้ช่วยให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ นิสิตปริญญาโทด้วยกันที่ได้ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในทุก ๆ ด้าน และเนื่องจากทุนในการทำวิจัยบางส่วนได้รับการอุดหนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านมาโดยตลอด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	2
2. ชนิดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	3
2.1 จอยน์ทอร์คเซนเซอร์ (joint torque sensor)	3
2.2 เทคไทล์เซนเซอร์หรือทัชเซนเซอร์ (tactile sensor or touch sensor)	4
2.3 ริสต์เซนเซอร์ (wrist sensor)	10
3. การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	14
3.1 หลักการวัดแรงและโมเมนต์ของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	14
3.2 การพิจารณาโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	15
3.3 การวัดความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ	20
4. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
4.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
4.2 การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์	25
4.3 การวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก (linear static analysis)	25
4.4 การวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมด (normal modes analysis)	26
4.5 ชนิดของเอลิเมนต์	27

5. การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	30
6. การทดลอง	60
6.1 การปรับเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรง	61
6.2 การทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านสแตติกของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง	67
6.3 การทดลองวัดแรงและโมเมนต์ทุกทิศทางพร้อม ๆ กัน	69
7. ผลการทดลองและการวิเคราะห์	71
7.1 การทดลองเพื่อปรับเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจวัดแรง Sensor III	71
7.2 การทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านสแตติก ของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง Sensor III	104
7.2.1 การหาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของ Sensor III	104
7.2.2 การหาค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability) ของ Sensor III	135
7.2.3 การหาค่าความละเอียด (resolution) ของ Sensor III	141
7.3 การทดลองวัดแรงและโมเมนต์ในทุกทิศทางของ Sensor III	142
7.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จาก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่าง Sensor II และ Sensor III	144
7.4.1 การเปรียบเทียบด้วยค่าคอนดิชันนัมเบอร์	144
7.4.2 การเปรียบเทียบด้วยค่าความไว	145
7.4.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จาก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor III	146
8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	148
8.1 สรุปผล	148
8.2 ข้อเสนอแนะ	149
รายการอ้างอิง	150
บรรณานุกรม	151
ภาคผนวก	
ก. การแปลงแรงและโมเมนต์ที่เซนเซอร์เฟรมเพื่อหาแรงและโมเมนต์ที่ทูลเฟรม	153
ข. ตารางแสดงวงจรวิธิตอนบริดจ์และการใช้งาน	156
ค. ตัวอย่างการคำนวณ	158

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....159



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของ Sensor II ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	35
5.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของ Sensor II ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
5.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดของ วงแหวนในเปลี่ยนไป	39
5.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดของวงแหวนด้านนอก	40
5.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดของ วงแหวนนอกเปลี่ยนไป	41
5.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความหนาของโครงสร้าง	42
5.7 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาด ความหนาของโครงสร้างเปลี่ยนไป	42
5.8 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความหนาของครีป	43
5.9 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาด ความหนาของครีปเปลี่ยนไป	44
5.10 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของครีป	45
5.11 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาด ความยาวของครีปเปลี่ยนไป	45
5.12 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบ A ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	50
5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบ B ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	53
5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างโครงสร้าง Sensor II, แบบ A และ แบบ B	55
5.15 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป	55
5.16 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเค้นมากที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป	55
5.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป	56
5.18 แสดงแรงและโมเมนต์มากที่สุดที่โครงสร้าง A และ B สามารถวัดได้โดย โครงสร้างเสียรูปไม่เกิน 25 ไมครอนหรือบิดไปไม่เกิน 0.002 องศา	58
7.1 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง F_x กับความเครียดที่วัดได้ จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

ตาราง	หน้า
7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง F_y กับความเครียดที่วัดได้จากชุด สเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	76
7.3 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง F_z กับความเครียดที่วัดได้จากชุด สเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	81
7.4 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ M_x กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	86
7.5 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ M_y กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	91
7.6 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ M_z กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด	96
7.7 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านลบ	104
7.8 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านลบ	105
7.9 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง F_x ลบและโมเมนต์ M_y บวก	106
7.10 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านบวก	108
7.11 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านบวก	109
7.12 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง F_x บวกและโมเมนต์ M_y ลบ	110
7.13 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านลบ	112
7.14 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านลบ	113
7.15 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง F_y ลบและโมเมนต์ M_x ลบ	114
7.16 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านบวก	116
7.17 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านบวก	117
7.18 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง F_y บวกและโมเมนต์ M_x บวก	118
7.19 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านลบ	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

ตาราง	หน้า
7.20 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านลบ	121
7.21 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fz ลบ	122
7.22 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนัก ในแนวแกน z ด้านบวก	123
7.23 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านบวก	124
7.24 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fz บวก	125
7.25 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz ลบ	127
7.26 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz ลบ	128
7.27 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mz ลบ	129
7.28 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz บวก	130
7.29 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz บวก	131
7.30 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mz บวก	132
7.31 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน x ลบ	135
7.32 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน x บวก	135
7.33 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน y ลบ	136
7.34 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน y บวก	136
7.35 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z ลบ	137
7.36 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z บวก	137
7.37 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z ลบ	138
7.38 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z บวก	138
7.39 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11	142
7.40 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11	142
7.41 แสดงผลความผิดพลาดของการวัดแรงและโมเมนต์เป็น (%reading) เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11	143
7.42 แสดงผลความผิดพลาดของการวัดแรงและโมเมนต์เป็น (%full scale) เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11	143
7.43 แสดงผลเปรียบเทียบค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของ Sensor II และ Sensor III	144
7.44 แสดงผลเปรียบเทียบความไวของ Sensor II และ Sensor III	145

ตาราง

หน้า

7.45 แสดงผลเปรียบเทียบความไวของ Sensor III ระหว่าง
ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 146



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 เทคโนโลยีเซนเซอร์และตำแหน่งการติดตั้ง	4
2.2 ไปนารีทัชเซนเซอร์	5
2.3 อนาล็อกทัชเซนเซอร์แบบพื้นฐาน	5
2.4 อุปกรณ์วัดแรงแบบโพโตดีเทกซ์เตอร์เทคโนโลยีเซนเซอร์	6
2.5 คอนดักทีฟอีลาสโทเมอร์เซนเซอร์	7
2.6 แอนิโซโทรพิกคอลลิคอนดักทีฟรับเบอร์เซนเซอร์	8
2.7 ออปติคัลเท็กซ์ไทล์เซนเซอร์	9
2.8 การทำงานของสลิฟเซนเซอร์	10
2.9 ตำแหน่งการติดของริสท์เซนเซอร์บนหุ่นยนต์	11
2.10 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดของ SRI-NASA Ames	11
2.11 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Maltese cross	12
3.1 แสดงการวัดแรงและโมเมนต์โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	15
3.2 แสดงตำแหน่งสเตรนเกจและแกนสมมุติ	17
3.3 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอร์เตอร์บริดจ์	21
3.4 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์	21
3.5 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์	21
3.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงดัด และลักษณะการติดสเตรนเกจ	22
3.7 แสดงลักษณะของการติดสเตรนเกจและแกนสมมุติบนโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	23
4.1 ลักษณะของรีดเอลิเมนต์	27
4.2 ลักษณะเอลิเมนต์แบบท้อ	27
4.3 รูปร่างของเอลิเมนต์แบบ 2 มิติแบบต่าง ๆ	28
4.4 รูปร่างต่าง ๆ ของโซลิดเอลิเมนต์	29
5.1 ลักษณะโครงสร้างของ Sensor II	31
5.2 ขนาดของ Sensor II	31
5.3 ลักษณะเงื่อนไขขอบเขตของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	32
5.4 ลักษณะการใส่แรงในแนวแกน x บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	33
5.5 ลักษณะการใส่แรงในแนวแกน z บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	33

5.6	ลักษณะการใส่โมเมนต์รอบแกน x บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	34
5.7	ลักษณะการใส่โมเมนต์รอบแกน z บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	34
5.8	ตำแหน่งของสเตรนเกจที่ติดบน Sensor II	35
5.9	รูปร่างเบื้องต้นของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ออกแบบใหม่	37
5.10	ขนาดเบื้องต้นของอุปกรณ์วัดแรงที่ออกแบบใหม่	37
5.11	แสดงส่วนของวงแหวนด้านใน	38
5.12	แสดงจุดที่จะวัดความเครียดโดยจะอยู่ห่างจากขอบวงแหวนใน 5 มม.	38
5.13	แสดงส่วนของวงแหวนด้านนอก	40
5.14	แสดงส่วนความหนาของโครงสร้าง	41
5.15	แสดงส่วนความหนาของครีป	43
5.16	แสดงส่วนความยาวของครีป	44
5.17	ลักษณะโครงสร้างแบบ A	46
5.18	ขนาดของโครงสร้างแบบ A	46
5.19	แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรง F_x	47
5.20	แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรง F_z	47
5.21	แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่โมเมนต์ M_x	48
5.22	แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่โมเมนต์ M_z	48
5.23	แสดงการเสียรูปเมื่อใส่แรง F_x	49
5.24	แสดงการเสียรูปเมื่อใส่แรง F_z	49
5.25	แสดงการเสียรูปเมื่อใส่โมเมนต์ M_x	50
5.26	แสดงการเสียรูปเมื่อใส่โมเมนต์ M_z	50
5.27	บริเวณที่ติดสเตรนเกจบนโครงสร้างแบบ A	51
5.28	ลักษณะโครงสร้างแบบ B	52
5.29	ขนาดโครงสร้างแบบ B	53
6.1	โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Sensor III ซึ่งทำจากอลูมิเนียม	63
6.2	แสดงชุดประกอบของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	63
6.3	ชุดโต๊ะทดลองที่ใช้ในการปรับเทียบค่า	64
6.4	ดิจิทัลสเตรนบริจสำหรับใช้วัดความเครียด	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ณ

ภาพประกอบ	หน้า
6.5 แสดงลักษณะการใส่แรง F_x และ F_y บนโต๊ะทดลอง	65
6.6 แสดงลักษณะการใส่แรง F_z ในแนวแกน Z ลบ	65
6.7 แสดงลักษณะการใส่แรง F_z ในแนวแกน Z บวก	66
6.8 แสดงลักษณะการใส่โมเมนต์ M_x และ M_y	66
6.9 แสดงลักษณะการใส่โมเมนต์ M_z	67
6.10 แสดงลักษณะการใส่แรง F_x และ M_y , F_y และ M_x ในการทดลองหา ค่าความถูกต้องและรีพีทอะบิลิตี้	69
6.11 แสดงลักษณะการใส่แรงและโมเมนต์ทุกทิศทางและขนาดก้อนน้ำหนักที่ใช้	70
7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1	72
7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2	72
7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3	73
7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4	73
7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5	74
7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6	74
7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7	75
7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8	75
7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1	77
7.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2	77
7.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3	78
7.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4	78
7.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5	79
7.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6	79
7.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7	80
7.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8	80
7.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1	82
7.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2	82
7.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3	83
7.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4	83
7.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5	84

ภาพประกอบ	หน้า
7.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fx บวก	111
7.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ My ลบ	111
7.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fy ลบ	115
7.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mx ลบ	115
7.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fy บวก	119
7.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mx บวก	119
7.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fz ลบ	126
7.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fz บวก	126
7.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mz ลบ	133
7.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mz บวก	133
ก.1 แสดงการกำหนดโคออร์ดิเนตเฟรมของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	153

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นยุคที่มีการแข่งขันมากขึ้น อุตสาหกรรมในประเทศบางอย่างที่ใช้แรงงานมนุษย์เป็นหลัก เริ่มปรับเปลี่ยนหันมาใช้ระบบคอมพิวเตอร์หรือหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการผลิตมากขึ้นเพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพสูงและรวดเร็วกว่าเดิม โดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะให้การควบคุมเป็นแบบควบคุมตำแหน่ง (position control) แต่ในงานบางประเภทเราไม่สามารถจะใช้การควบคุมแบบควบคุมตำแหน่งแต่เพียงอย่างเดียวเพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานขึ้น เช่น ในงานประกอบชิ้นส่วน หรือ ในงานขัดผิว เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการนำเอาวิธีการควบคุมแบบควบคุมแรง (force control) มาใช้ ซึ่งการที่จะทำการควบคุมแรงให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจจู้แรง (force sensor) ที่มีประสิทธิภาพเสียก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นงานพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจู้แรงสำหรับแขนกลต่อจากรุ่นที่ได้ทำวิจัยมาก่อนแล้ว

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อทำการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจู้แรงขึ้นใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิจัย และมีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ทำการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจู้แรงขึ้นใหม่ เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจู้แรงเดิมมีปัญหาในการวัดแรงในแนวแกน x และ y เสร็จแล้วนำโครงสร้างที่ออกแบบใหม่นี้ไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมกับตรวจสอบด้วยมาตรฐานหนึ่งที่เรียกว่า คอนดิชันนัมเบอร์ (condition number) ว่าโครงสร้างแบบใหม่นี้มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม จากนั้นนำมาสร้างจริงและทำการทดลองเพื่อตรวจสอบผล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจในการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงแบบสเตรนเกจมากขึ้น
2. มีความเข้าใจในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน

3. มีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่ไม่คาดคิดระหว่างทำการวิจัย
4. ได้อุปกรณ์ตรวจจับสนแรงที่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้จริงในอนาคต

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับสนแรงแบบสเตรอนเกจ
2. ศึกษาทำความเข้าใจระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปเพื่อนำมาช่วยในการวิจัย
3. ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) ของโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนแรงใหม่ แล้วนำไปวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น เมื่อมีแรงหรือโมเมนต์ชนิดต่าง ๆ มากระทำบนแบบจำลองนั้น เพื่อให้ได้โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนแรงที่เหมาะสมที่สุด
4. ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนแรงและทดสอบผล
5. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล
6. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ชนิดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

ในอุตสาหกรรมปัจจุบันได้มีการอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ได้มีการนำเอาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในการทำงานต่างๆ แทนมนุษย์ เพื่อที่จะช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของสินค้า รวมไปถึงใช้ในงานที่มีสภาวะแวดล้อมที่อันตรายไม่เหมาะสมกับมนุษย์ การจะทำให้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการนำเอาอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) ต่าง ๆ ติดลงไปบนหุ่นยนต์เพื่อให้มนุษย์สามารถรู้ถึงสภาวะต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ได้ โดยอาจแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- 1) โพรพริโอเซพทีฟเซนเซอร์ (proprioceptive sensor) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้วัดสภาวะภายในของตัวหุ่นยนต์เองเช่น ตำแหน่ง ความเร็ว แรง แรงบิด เป็นต้น ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานที่จำต้องรู้ของหุ่นยนต์ตัวอย่างเช่น จำต้องรู้ว่ามือจับของหุ่นยนต์ (gripper) ว่ามันเปิดหรือปิดอยู่ จำต้องรู้ถึงตำแหน่งของปลายแขนว่าในขณะนั้น ๆ อยู่ที่ไหน อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้ก็ได้แก่ เอ็นโคเดอ (encoder) และรีโซลเวอร์ (resolver) ซึ่งเป็นตัวที่ใช้ในการวัดตำแหน่ง ทัคโคมิเตอร์ (tachometer) ซึ่งเป็นตัวที่ใช้ในการวัดความเร็ว เป็นต้น
- 2) เพอร์เซพชันเซนเซอร์หรือฮีเทโรเซพทีฟเซนเซอร์ (perception or heteroceptive sensor) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ตรวจวัดสภาวะของสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ของตัวหุ่น อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้ก็ได้แก่ เทกซ์ไทล์เซนเซอร์ (tactile sensor) พร็อกซิมีตี้เซนเซอร์ (proximity sensor) และระบบการมองเห็น (vision system)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (force sensor) นั้นก็จะเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดหนึ่งในหลาย ๆ ประเภทที่มี ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์นั้นมีประสาทรับรู้ทางการสัมผัส ทำให้สามารถนำหุ่นยนต์นั้นมาใช้ในการควบคุมแบบควบคุมแรง (force control) ได้โดยอาจแบ่งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับใช้ในการควบคุมแบบควบคุมแรงออกเป็น 3 ประเภทดังนี้คือ จอยน์ทอร์คเซนเซอร์ เทคไทล์เซนเซอร์และริสท์เซนเซอร์

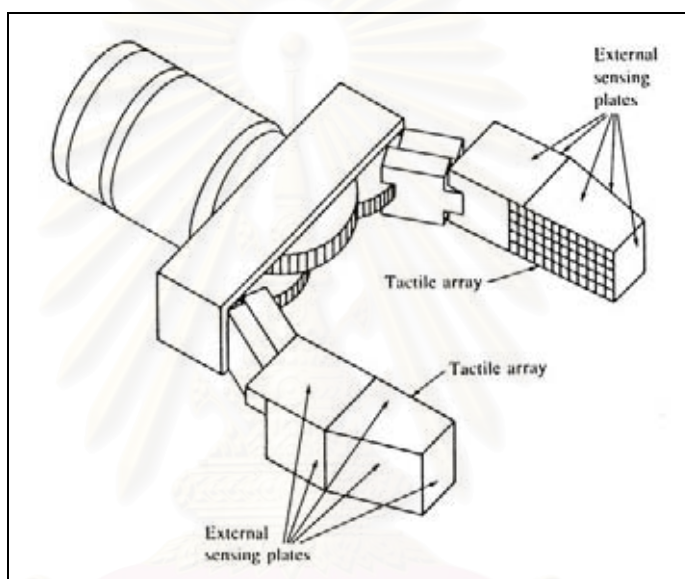
2.1 จอยน์ทอร์คเซนเซอร์ (joint torque sensor)

จะประกอบด้วยสเตรนเกจหลายตัวติดที่ตรงเพลาขับ ในกรณีที่มือเตอร์เป็นตัวขับ ก็สามารถใส่กระแสที่จ่ายให้แก่มอเตอร์มาคำนวณแรงบิดได้ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงประเภทนี้

เหมาะกับการควบคุมบางอย่าง แต่ไม่เหมาะที่จะใช้วัดแรงที่กระทำระหว่างปลายแขนกล (end-effector) กับชิ้นงาน

2.2 เทคโนโลยีเซนเซอร์หรือทัชเซนเซอร์ (tactile sensor or touch sensor)

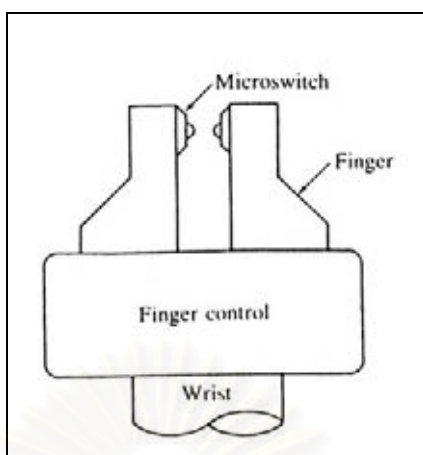
มักจะติดตั้งนิ้วของมือจับ (fingers of the gripper) เพื่อใช้ตรวจวัดแรงบีบที่กระทำกับชิ้นงานหรือใช้เพื่อตรวจสอบรูปร่างของชิ้นงานดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปจะวัดแรงได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ทิศทาง



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีเซนเซอร์และตำแหน่งการติดตั้ง

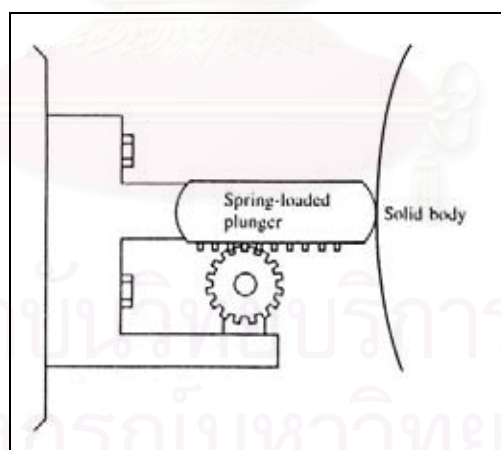
โดยอาจแบ่งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงประเภทนี้ออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบไบนารี (binary) และแบบอนาล็อก (analog) โดยแบบไบนารีก็ได้แก่ พวกสวิตช์ต่าง ๆ ที่จะบอกให้รู้ว่ามียังหรือไม่มีชิ้นงานอยู่ที่ส่วนมือจับของหุ่นยนต์ ส่วนแบบอนาล็อกนั้นจะให้สัญญาณออกมาซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกระทำที่ส่วนมือจับ รายละเอียดมีดังนี้

1. ไบนารีทัชเซนเซอร์ อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้จะเป็นอุปกรณ์แบบสัมผัสเช่น ไมโครสวิตช์ โดยตัวสวิตช์จะติดไว้ที่ผิวด้านในของส่วนมือจับดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะมีไว้สำหรับตรวจดูว่ามีชิ้นงานอยู่ระหว่างมือจับหรือไม่ นอกจากนี้ยังอาจจะใช้สวิตช์หลายตัวติดบนมือจับของหุ่นยนต์เพื่อจะได้ข้อมูลมากขึ้น



รูปที่ 2.2 ไบนารีทัชเซนเซอร์

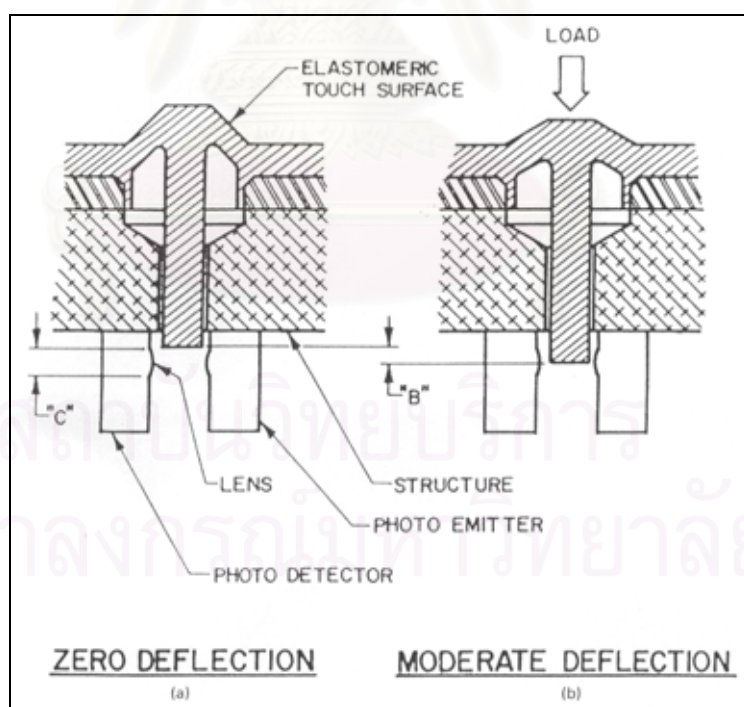
2. อนาล็อกทัชเซนเซอร์ อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้จะให้สัญญาณออกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่วัด ตัวอย่างที่ง่ายที่สุดแสดงในรูปที่ 2.3 โดยจะเห็นว่าอุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยแท่งสปริงโหลด (Spring-loaded plunger) ซึ่งจะมีกลไกเชื่อมต่อกับเพลาหมุน การเคลื่อนที่ของแท่งสปริงอันเนื่องมาจากแรงภายนอกจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับการหมุนของเพลา โดยการหมุนของเพลาจะวัดได้จากโพเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer) ซึ่งถ้าเรารู้ค่าสัมประสิทธิ์ค้ำที่ของสปริงก็จะสามารถคำนวณหาแรงจากระยะทางที่วัดได้



รูปที่ 2.3 อนาล็อกทัชเซนเซอร์แบบพื้นฐาน

ต่อมาได้มีการพัฒนาทัชเซนเซอร์เพื่อให้สามารถวัดแรงบนพื้นที่กว้าง ๆ แทนที่จะวัดแรงเป็นจุด โดยพื้นผิวด้านในของมือจับจะถูกรวบรวมไปด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวนมากประกอบกันเป็นแบบโครงร่างตาข่าย (Array) ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้ก็มีหลายประเภทด้วยกันดังตัวอย่างต่อไปนี้

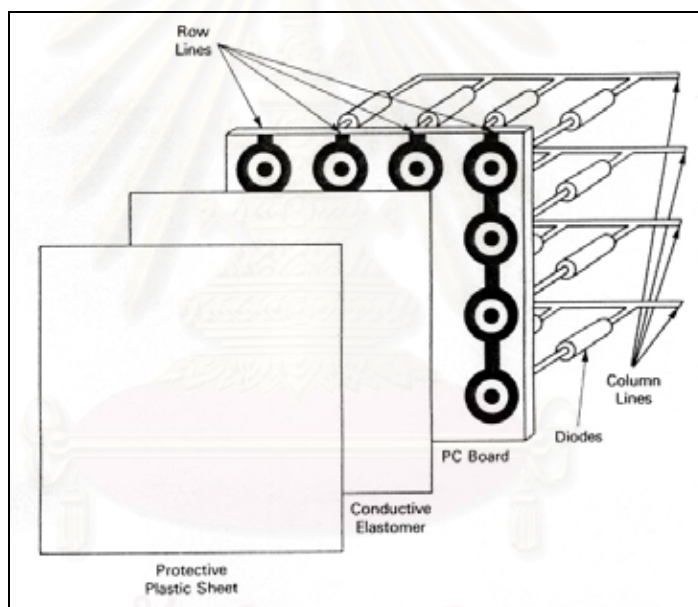
2.1 โฟโตดีเทกซ์เตอร์เทกไทล์เซนเซอร์ (photodetector tactile sensor) ลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.4 (ในรูปที่ 2.4 แสดงถึงโครงสร้างของเซนเซอร์เพียง 1 ชุด ซึ่งเวลาใช้จริงจะต้องมีหลาย ๆ ชุดประกอบกันเป็นโครงร่างตาข่าย) โดยรูป (a) จะเป็นรูปแสดงเวลาที่ยังไม่ได้รับโหลด ส่วนรูป (b) จะเป็นรูปเมื่อรับโหลดแล้ว ซึ่งส่วนที่จะใช้ตรวจวัดแรงนั้นจะหุ้มด้วยวัสดุอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งมีลักษณะคล้ายยาง หลักการทำงานก็คือ เมื่อมีชิ้นงานมาวางบนแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ก็จะทำให้อีกด้านหนึ่งยื่นเข้าไปขวางทางเดินของแสง ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า โฟโตอิมิตเตอร์ (photo emitter) ทำให้ตัวรับแสงที่เรียกว่า โฟโตดีเทกซ์เตอร์ (photo detector) รับแสงได้แตกต่างกันไป ตัวรับแสงนี้จะส่งสัญญาณขาออกเป็นความต่างศักย์ที่มีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นกับความเข้มแสงที่รับมา ซึ่งจากสัญญาณที่ได้เมื่อนำไปผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก็จะได้ข้อมูลเป็น รูปร่าง ขนาดและตำแหน่งของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังสามารถรู้แรงได้เนื่องจากระยะยุบตัวของยางอีลาสโตเมอร์ ความเข้มแสงและความต่างศักย์ที่ส่งออกจากโฟโตดีเทกซ์เตอร์จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของแรงที่มากดลงบนยางนั่นเอง แต่อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้มีข้อเสียคือ จะมีปัญหาทางด้านฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และความแข็งแรงของยางที่อาจจะมีการสึกหรอได้ง่าย ทำให้การวัดอาจไม่ถูกต้องเท่าที่ควร



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์วัดแรงแบบโฟโตดีเทกซ์เตอร์เทกไทล์เซนเซอร์

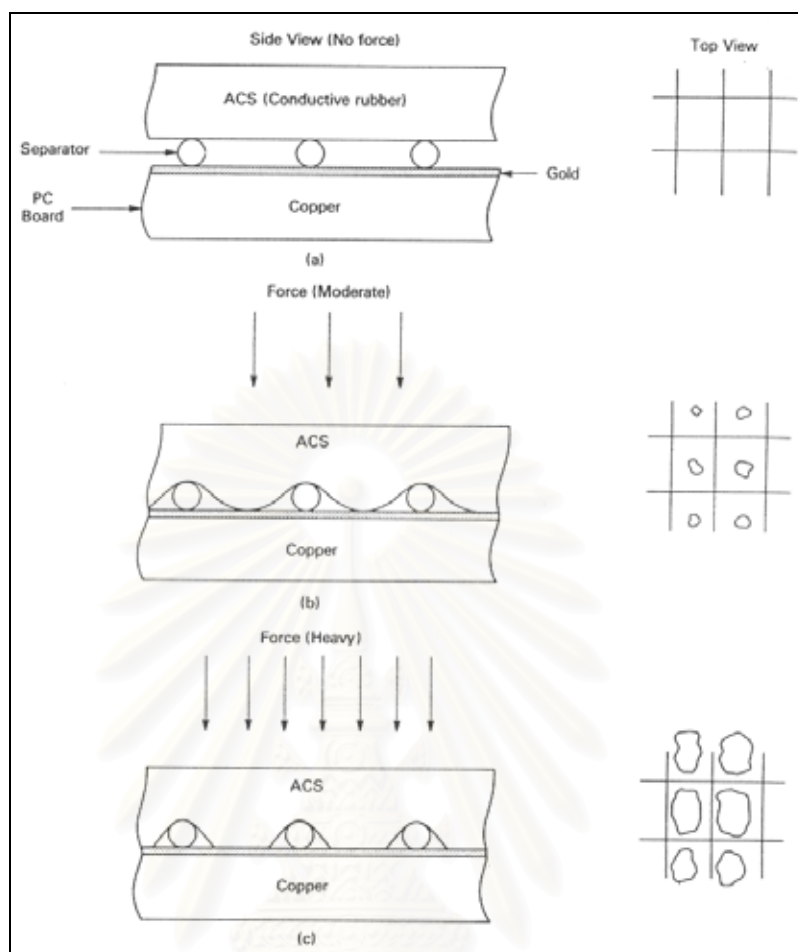
2.2 คอนดักทีฟอีลาสโตเมอร์เซนเซอร์ (conductive elastomer sensor) อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้จะใช้วัสดุยางอีลาสโตเมอร์แบบที่เรียกว่า ดีเฟล็กโตมิเตอร์ (deflectometer) ซึ่งยาง

อีลาสโตเมอร์แบบนี้จะมีคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าซึ่งทำได้โดยการเติมเงินหรือคาร์บอนลงไป คุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของดีเฟลกโตมิเตอร์จะมีลักษณะพิเศษคือ ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อดีเฟลกโตมิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอันเนื่องมาจากการถูกกดอัด อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้จะมีด้วยกัน 3 ชั้นประกอบด้วยแผ่นพลาสติกซึ่งคลุมแผ่นยางนำไฟฟ้า แผ่นวงจรไฟฟ้าจะอยู่ล่างสุด ซึ่งในแผ่นวงจรไฟฟ้าจะมีขั้วไฟฟ้าอยู่โดยจะมีวงแหวนในกับวงแหวนนอก วงแหวนในกับนอกนี้จะต่อกันคนละทิศทาง (วงแหวนในต่อกันในแนวนอน ส่วนวงแหวนนอกจะต่อกันในแนวตั้ง) ดังรูปที่ 2.5 โดยวงแหวนนอกจะเป็นขั้วบวก วงแหวนในจะเป็นขั้วลบ เมื่อมีแรงกดมากจะทำบ่นแผ่นยางนำไฟฟ้าจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ต่างกันไปด้วย เมื่อนำเอาข้อมูลที่วัดได้ไปผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก็จะสามารถหาขนาดของแรงได้



รูปที่ 2.5 คอนดักทีฟอีลาสโตเมอร์เซนเซอร์

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ตรวจรู้แรงอีกแบบหนึ่งที่ใช้แผ่นยางซิลิโคนนำไฟฟ้าเหมือนกัน แต่แตกต่างกันในรายละเอียดนั่นคือ ยางที่จะใช้ในอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ มันจะนำไฟฟ้าในทิศทางเดียว (anisotropically conductive silicon rubber (ACS)) ลักษณะของอุปกรณ์แบบนี้แสดงในรูปที่ 2.6 โดยอาจเรียกมันว่า แอนิโซโทรพิกอลลิคอนดักทีฟรับเบอร์เซนเซอร์ (anisotropically conductive rubber sensor)

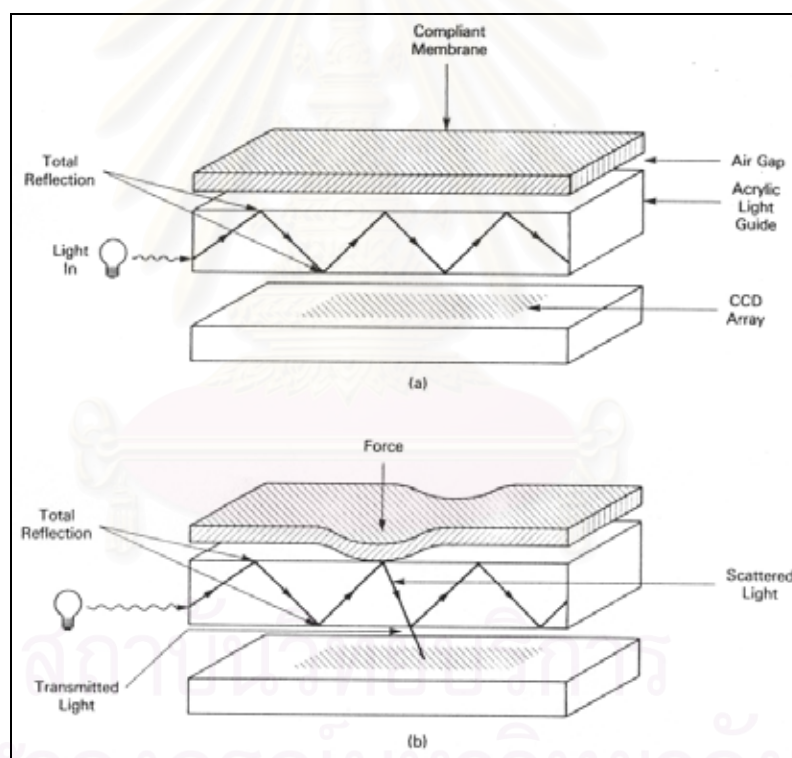


รูปที่ 2.6 แอนิไซโทรพิคอลลีคอนดักทีฟริบบอร์เซนเซอร์

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ามีเซพาราเตอร์ (separator) ซึ่งทำมาจากไนลอนชั้นกลางระหว่างแผ่นยางและแผ่นวงจร เมื่อตอนไม่มีความดันแผ่นยางก็จะไม่สัมผัสกับแผ่นวงจร แต่เมื่อมีความดันเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้หน้าสัมผัสระหว่างแผ่นยางกับแผ่นวงจรมากขึ้นไปด้วย และเนื่องจากความต้านทานหน้าสัมผัส (contact resistance) เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของหน้าสัมผัส ดังนั้นยิ่งมีความดันมากขึ้นเท่าไรความต้านทานหน้าสัมผัสก็จะน้อยลงเท่านั้น หลักการทำงานก็คล้ายกับคอนดักทีฟอีลาสโตเมอร์เซนเซอร์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้ความไวในการสัมผัส (touch sensitivity) ขึ้นกับความหนาของเซพาราเตอร์ สำหรับข้อดีของอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้คือ เรื่องอายุการใช้งานของแผ่นยางและปัญหาทางด้านฮิสเทอรีซิส (hysteresis)

2.3 ออปติคัลเทกซ์ไทล์เซนเซอร์ (optical tactile sensor) อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทนี้จะใช้หลักการหักเหของแสง โดยมีลักษณะตามรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยคอมไพแลนต์เมมเบรน (compliant membrane) แท่งอะคริลิกใส (clear acrylic) นำแสงได้ แหล่งกำเนิดแสง

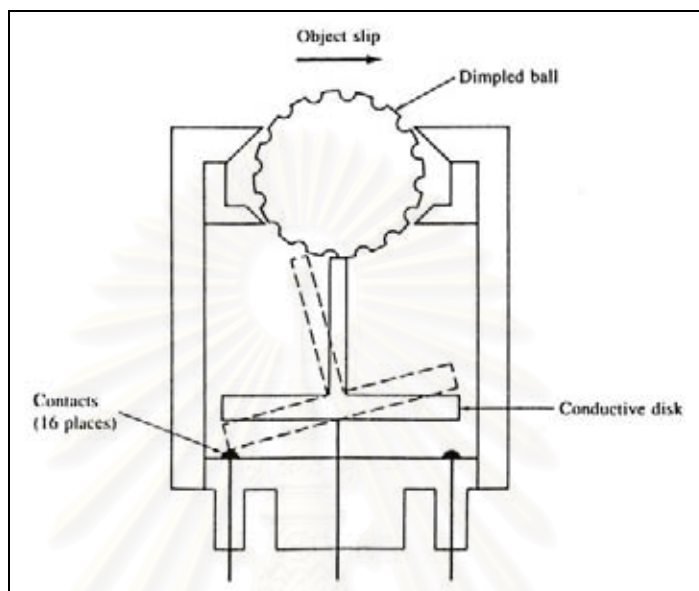
และตัวรับแสงแบบชาร์จคัพเฟิลด์ไวย์ซ์ (Charge-Coupled device (CCD)) โดยระหว่างคอมไพล์แอนท์เมมเบรนกับแท่งอาคริกจะมีช่องอากาศเล็ก ๆ กั้นอยู่ ซึ่งเมื่อตอนไม่มีแรงดันมากระทำที่แผ่นเมมเบรน แสงจากตัวนำทางด้านซ้ายเกือบทั้งหมดจะวิ่งผ่านแท่งอาคริกไปเนื่องจากเกิดการสะท้อนกลับที่บริเวณรอยต่อของอากาศกับอาคริก แต่เมื่อมีแรงดันมากระทำบนแผ่นเมมเบรนจนกระทั่งแผ่นเมมเบรนสัมผัสกับแท่งอาคริก จะทำให้แสงที่ผ่านบริเวณผิวสัมผัสนี้เกิดการกระจายตัวและสะท้อนไปตกบนลงบน CCD ที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถใช้วิธีการออปติคัลอิมเมจโปรเซสซิง (optical image processing) ในการหาขนาดรูปร่างของชิ้นงานได้ อีกทั้งความเข้มของแสงที่สะท้อนนี้เป็นสัดส่วนโดยประมาณกับความดันที่กดลงบนแผ่นเมมเบรน ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้หาแรงได้เช่นกัน โดยสามารถเพิ่มความละเอียด (resolution) ด้วยการเพิ่มจำนวน CCD ให้มีโครงร่างตาข่าย (array) ที่ละเอียดขึ้น



รูปที่ 2.7 ออปติคัลเท็กส์ไทล์เซนเซอร์

จะเห็นว่าอุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้วัดแรงในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว แต่ยังมีทเซนเซอร์อีกประเภทหนึ่งที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ในแนวสัมผัสกับพื้นผิวหรือที่เรียกกันว่า สลิปเซนเซอร์ (slip sensor) ซึ่งจะมีวิธีในการวัดดังรูปที่ 2.8 อุปกรณ์ชนิดนี้จะประกอบด้วย ลูกกลิ้ง (dimpled ball) แท่งเหล็กเชื่อมติดกับตรงกลางของจานนำไฟฟ้า (conductive disk) และหน้าสัมผัสนำไฟฟ้า (contact) ซึ่งอยู่ใต้จานนำไฟฟ้า หลักการทำงานคือ เมื่อลูกกลิ้งหมุนอันเนื่อง

มาจากวัตถุเคลื่อนผ่านลูกกลิ้ง จะทำให้แท่งเหล็กและจานนำไฟฟ้าสั้นด้วยความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของลูกกลิ้ง ทิศทางการหมุนของลูกกลิ้งรู้จากจานนำไฟฟ้าว่าไปสัมผัสกับหน้าสัมผัสตัวไหน เมื่อนำไปผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก็จะรู้ทิศทางและแรงเฉื่อยของการสลิปได้

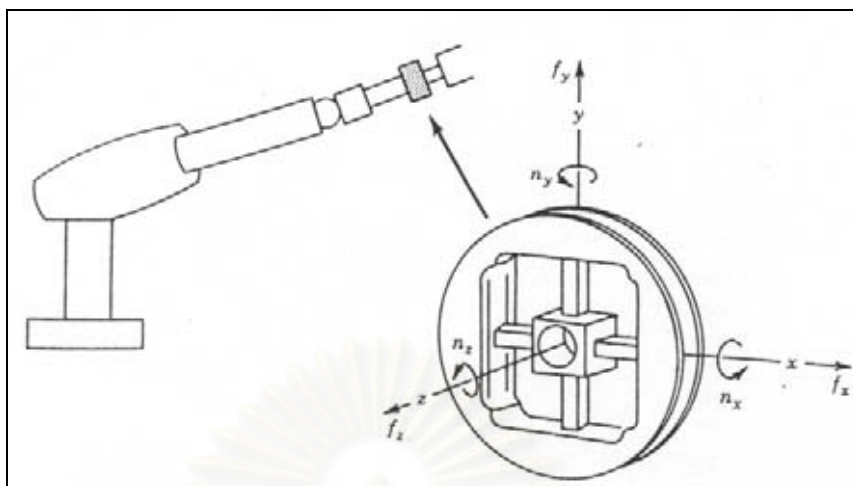


รูปที่ 2.8 การทำงานของสลิปเซนเซอร์

2.3 ริสต์เซนเซอร์ (wrist sensor)

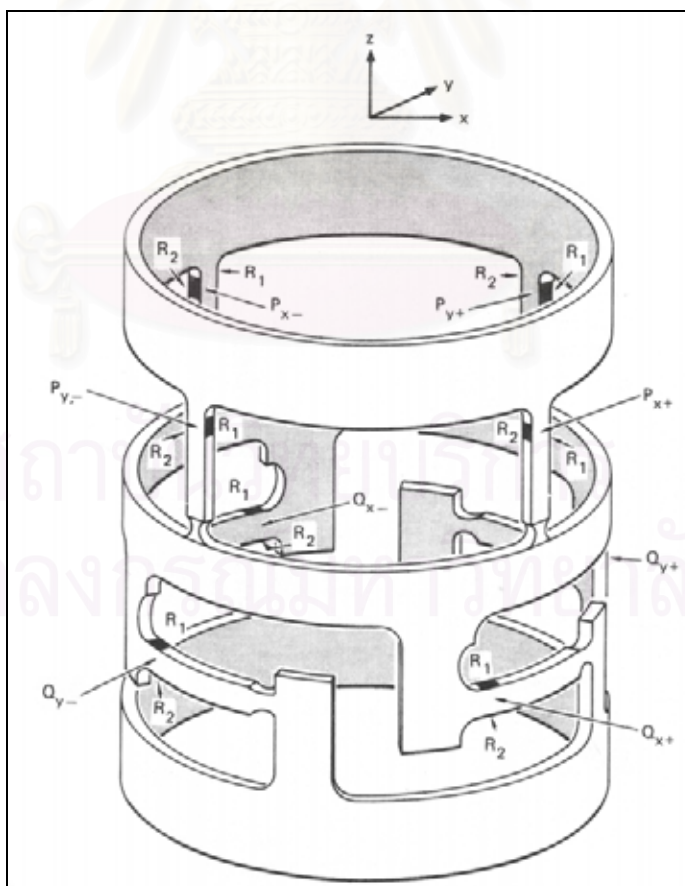
เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ใช้วัดแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทำงานส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน มักจะติดตั้งระหว่างปลายแขนกลกับข้อต่อสุดท้ายของแขนกลดังรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปจะวัดแรงได้ตั้งแต่ 3 ถึง 6 ทิศทาง ซึ่งก็แล้วแต่ความต้องการของแต่ละงาน เซนเซอร์แบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันไปตามแต่ออกแบบ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสเตรนเกจ (strain gage) หลายตัวที่จะใช้วัดการเสียรูปของโครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้าง ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบนี้ ซึ่งเป็นส่วนที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจ มีดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการติดตั้งของวิสต์เซนเซอร์บนหุ่นยนต์

1. อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดของ SRI-NASA Ames (SRI-NASA Ames force-torque sensor) รูปร่างโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้ ทำจากอลูมิเนียมกัดขึ้นรูป โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.10

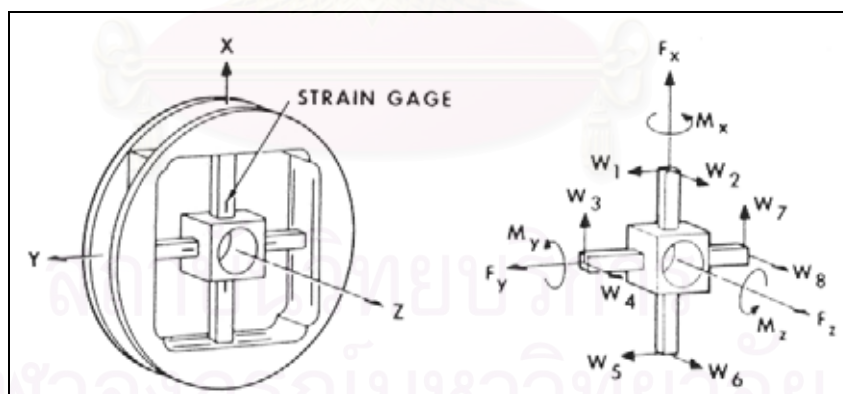


รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดของ SRI-NASA Ames

อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถวัดแรงและโมเมนต์ได้ 6 ทิศทางด้วยกันคือ สามารถวัดแรงในแนวแกน X Y และ Z โมเมนต์รอบแกน X Y และ Z ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าสเตรนเกจจะถูกนำไปติดบริเวณคานทั้ง 8 โดยสังเกตเห็นว่าสเตรนเกจชุด Px+ และ Px- ตั้งฉากกับแกน Y ส่วนคอคอดที่ตรงปลายคานมีไว้เพื่อเพิ่มขนาดของความเครียด (strain) บริเวณที่ติดสเตรนเกจ โดยถ้าติดสเตรนเกจดังรูปที่ 2.10 ค่าของความต่างศักย์เอาท์พุทจากสเตรนเกจชุด Px+, Px-, Py+, Py-, Qx+, Qx-, Qy+ และ Qy- จะเป็นสัดส่วนกับแรงและโมเมนต์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} F_x &\sim P_{y+} + P_{y-} \\ F_y &\sim P_{x+} + P_{x-} \\ F_z &\sim Q_{x+} + Q_{x-} + Q_{y+} + Q_{y-} \\ M_x &\sim Q_{y+} - Q_{y-} \\ M_y &\sim Q_{x+} - Q_{x-} \\ M_z &\sim P_{x+} - P_{x-} - P_{y+} + P_{y-} \end{aligned}$$

2. อุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Maltese cross ลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.11 โครงสร้างก่ดขึ้นรูปจากอลูมิเนียมเช่นกัน สเตรนเกจที่ใช้เป็นเซมิคอนดักเตอร์ สเตรนเกจเพื่อเพิ่มความไว (sensitivity) โดยจะใช้ด้วยกันทั้งหมด 8 คู่ ติดบริเวณคานทั้ง 4 ของเซนเซอร์



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Maltese cross

สำหรับการหาค่าแรงและโมเมนต์นั้นจะใช้ค่าความต่างศักย์ W_1 - W_8 ซึ่งได้จากสเตรนเกจที่ติดมาคูณกับทรานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ขนาด 6×8 ก็จะได้ค่าแรงและโมเมนต์ที่ต้องการ โดยทรานฟอร์มเมชันเมตริกซ์หาได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์กับค่าความต่างศักย์ชุดต่าง ๆ

โดยส่วนมากแล้ว wrist เซนเซอร์จะทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์เพื่อแปลงแรงและโมเมนต์ที่กระทำบนมือของหุ่นยนต์ (end effector) ไปเป็นการวัดการยุบตัวของโครงสร้างที่บริเวณข้อมือของหุ่นยนต์ (wrist) ข้อสำคัญที่ควรคำนึงก็คือ การเคลื่อนที่ไปของ wrist เซนเซอร์อันเนื่องจากแรงภายนอกจะต้องไม่มีผลกระทบกับความถูกต้องทางด้านตำแหน่งของหุ่นยนต์ หรืออาจสรุปคุณลักษณะของ wrist เซนเซอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความแข็งแรงสูง (high stiffness) ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ทางกลมีส่วนเกี่ยวข้องกับความแข็งแรง ดังนั้นอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงสูงจะทำให้แรงที่กระทำถูกกำจัด (damp) ไปได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การวัดค่าในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ มีความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความผิดพลาดทางด้านตำแหน่ง (positioning error) ของปลายแขนหุ่นยนต์ตอนที่มีแรงและโมเมนต์มากกระทำอีกด้วย
2. ขนาดกระทัดรัด (compact design) จะทำให้อุปกรณ์วัดแรงไม่ไปมีผลกระทบต่อการทำงานของแขนกลเมื่ออยู่ในพื้นที่จำกัดและจะไม่กระทบต่อวัตถุที่อยู่ในพื้นที่ทำงานของแขนกล ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งคือ ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงให้ใกล้กับเครื่องมือทำงานให้มากที่สุดเพื่อลดความผิดพลาดทางด้านตำแหน่งของแขนกล และควรที่จะลดระยะทางระหว่างปลายแขนกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงให้ใกล้กันที่สุดเพื่อที่จะลดแขนของแรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์
3. มีความเป็นลิเนียร์ดี (linearity) ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างแรงและโมเมนต์ที่มากกระทำกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากสเตรนเกจ จะทำให้การคำนวณหาขนาดของแรงและโมเมนต์ทำได้สะดวก นอกจากนี้การปรับเทียบก็ทำได้ง่ายเช่นกัน
4. ฮิสเทอรีซิสและแรงเสียดทานภายในต่ำ (low hysteresis and internal friction) ค่าแรงเสียดทานภายในจะลดค่าความไว (sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงลง เพราะแรงส่วนหนึ่งจะต้องนำไปใช้เพื่อเอาชนะค่าแรงเสียดทานนี้ ก่อนที่จะนำไปวัดการยุบตัว และยังมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งทำให้การวัดค่าไม่กลับมายังค่าเดิมเหมือนตอนเริ่มต้น เราอาจจะลดฮิสเทอรีซิสโดยการใช้อวัสดุเพียงชิ้นเดียวในการทำโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแทนที่จะใช้วัสดุหลาย ๆ ชิ้นมาประกอบกัน

บทที่ 3

การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่จะทำการออกแบบนี้จะเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สามารถวัดแรงและโมเมนต์ได้ 6 องศาอิสระ (degree of freedom (DOF)) คือ จะสามารถรับแรงตามแนวแกน x , y และ z และโมเมนต์รอบแกนดังกล่าวทั้งสาม โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวนี้จะเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้แรงประเภทริสต์เซนเซอร์ (wrist sensor) ใช้สเตรนเกจเป็นทรานสดิวเซอร์ แล้วนำค่าเอาท์พุทที่วัดได้จากสเตรนเกจ (เป็นความต่างศักย์หรือความเครียด (strain)) มาคำนวณหาแรงและโมเมนต์ต่อไป

3.1 หลักการวัดแรงและโมเมนต์ของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับตัวอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนั้น สามารถหาได้จากการคำนวณผ่านการวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งที่เรากำหนดบนตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนั้นทำให้เกิดการเสียรูปที่ยังอยู่ในช่วงที่ยืดหยุ่นได้ (elastic range) ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเครียดกับแรงและโมเมนต์ภายนอกที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_s = C_s f_s \quad (3.1)$$

โดยที่ ε_s คือ เวกเตอร์ของความเครียดขนาด $(n \times 1)$ มิติ

n คือ จำนวนตำแหน่งที่วัดความเครียด

C_s คือ สเตรนคอมไพแลนซ์เมตริกซ์ (strain compliance matrix) ขนาด $(n \times m)$ มิติ

f_s คือ เวกเตอร์ของแรงและโมเมนต์ซึ่งประกอบด้วยแรง F_s และโมเมนต์ M_s ซึ่งกระทำที่จุดกึ่งกลางของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

m คือ จำนวนแรงและโมเมนต์ของแรงภายนอกที่ต้องการจะวัด ซึ่งโดยปกติจะเท่ากับ 6 คือ ประกอบด้วยแรงในแนวแกน x , y และ z และโมเมนต์รอบแกน x , y และ z โดยที่ $n \geq m$ เสมอ

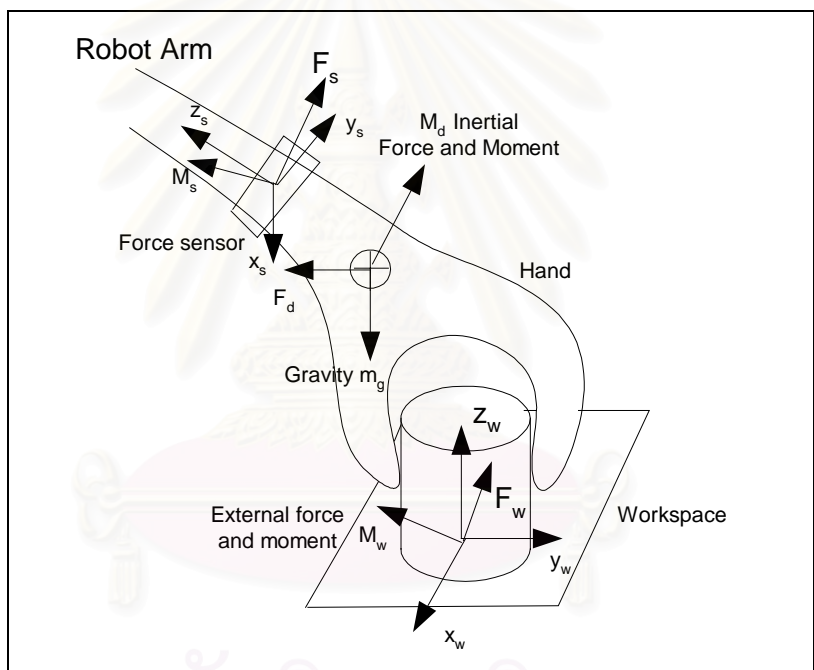
เนื่องจากจุดประสงค์ของการอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคือ ต้องการวัดแรงและโมเมนต์ภายนอกที่มากกระทำ ดังนั้นจากสมการที่ (3.1) ถ้า $n \geq m$ และ $\text{rank } C_s = m$ แล้วจะสามารถหา f_s ได้โดยอาศัยมัวร์-เพนโรสอินเวอร์ส (moore-penrose inverse) ของ C_s ดังนี้

$$f_s = C_s^+ \varepsilon_s \quad (3.2)$$

โดยที่ C_s^+ คือ เซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์ (sensor calibration matrix) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก C_s ดังสมการต่อไปนี้

$$C_s^+ = (C_s^T C_s)^{-1} C_s^T \tag{3.3}$$

ทั้งนี้แรงและโมเมนต์ที่ได้จากสมการที่ (3.2) นั้นเป็นแรงที่กระทำเทียบกับแกนอ้างอิงที่บริเวณจุดกึ่งกลางของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (F_s, M_s) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งหากต้องการหาแรงและโมเมนต์ที่เทียบกับแกนอ้างอิงที่บริเวณปลายแขนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (F_w, M_w) ก็สามารถคำนวณได้โดยใช้ฟอर्स-โมเมนต์ทรานส์ฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (force-moment transformation matrix) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดแรงและโมเมนต์โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

3.2 การพิจารณาโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

การที่จะทำให้ได้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่มีประสิทธิภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ

2 ประการคือ

1. ลักษณะของโครงสร้าง
2. ตัวทรานสดิวเซอร์ที่จะใช้

ดัชนีคอนดิชันนัมเบอร์ซึ่งนำเสนอโดย M. Uchiyama [1] จะเป็นดัชนีที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง โดยดัชนีคอนดิชันนัมเบอร์จะแสดงถึงความผิดพลาดในการวัดแรงของโครงสร้างที่ใช้

การหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์นั้น จำเป็นที่จะต้องรู้สเตรนคอมโพสิชันเมตริกซ์ C_s ที่แสดงในสมการที่ (3.1) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ โดยค่าของมันจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง โครงสร้างที่แตกต่างกันจะได้เมตริกซ์ C_s ที่แตกต่างกัน เราสามารถหาเมตริกซ์ C_s นี้ได้ 2 วิธีคือ

1. จากการทดลอง
2. จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อได้เมตริกซ์ C_s แล้วควรจะต้องทำการนอร์มอลไลซ์ (normalized) เสียก่อน ด้วยแรงและโมเมนต์มาตรฐานโดยจากสมการที่ (3.1) เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์แล้วจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_s = \bar{C}_s \bar{f}_s \quad (3.4)$$

โดย

$$\bar{f}_s = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & M_x & M_y & M_z \\ F_{std} & F_{std} & F_{std} & M_{std} & M_{std} & M_{std} \end{bmatrix}^T \quad (3.5)$$

$$\bar{C}_s = C_s \cdot \text{diag} [F_{std} \quad F_{std} \quad F_{std} \quad M_{std} \quad M_{std} \quad M_{std}] \quad (3.6)$$

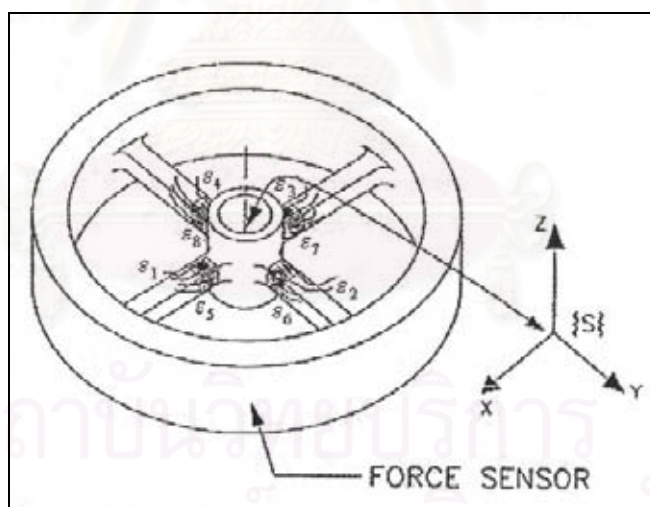
ส่วนค่าแรงมาตรฐาน (F_{std}) และโมเมนต์มาตรฐาน (M_{std}) นั้นมีหลักในการเลือก 2 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1 โดย T. Yosikawa, T. Miyazaki [2] นั้นมีหลักในการเลือกดังนี้คือ จะกำหนดให้ F_{std} มีค่าเท่ากับ 1 นิวตันเสมอ ส่วนค่า M_{std} จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดของตัวขยายของแรงเฉลี่ยกับขนาดของตัวขยายของโมเมนต์เฉลี่ย ซึ่งถ้า C_s อยู่ในสภาวะที่เป็นอุดมคติแล้ว C_s จะมีลักษณะดังต่อไปนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 & 0 & 0 & * \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & * \\ 0 & * & 0 & 0 & 0 & * \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & * \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่ * คือ ตัวเลขใด ๆ ที่ไม่เท่ากับ 0

เมตริกซ์ C_s ในสมการที่ (3.7) คือ รูปแบบในอุดมคติ (Ideal form) เมื่อการติดสเตรนเกจและแกนสมมุติมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงมีการติดสเตรนเกจทั้งหมด 8 ชุดด้วยกัน โดยชุดที่ 1 2 3 และ 4 จะติดอยู่ด้านบนและชุดที่ 5 6 7 และ 8 จะติดอยู่ทางด้านข้างของแกน โดยในกรณีที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถหาค่า * ที่อยู่ในเมตริกซ์ C_s ได้โดยอ่านค่าความเครียดตรงตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจไว้ แล้วนำค่าความเครียดที่อ่านได้นั้นมาหารด้วยแรงหรือโมเมนต์ภายนอกที่กระทำ



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งสเตรนเกจและแกนสมมุติ

จากสมการที่ (3.7) M_{std} จะมีค่าดังนี้

$$M_{std} = \frac{\text{ผลบวกของค่าสัมบูรณ์ของ * ทั้งหมดใน 3 คอลัมน์แรก}}{\text{ผลบวกของค่าสัมบูรณ์ของ * ทั้งหมดใน 3 คอลัมน์หลัง}} \quad (3.8)$$

วิธีที่ 2 โดย M. Uchiyama [1] นั้นจะใช้ค่าแรงสูงสุดและโมเมนต์สูงสุดที่ออกแบบเป็นค่า F_{std} และ M_{std} ตามลำดับ

หลังจากหาเมตริกซ์ \bar{C}_s ได้จะนำเมตริกซ์ \bar{C}_s มาหาค่าซิงกูลาร์วอลู (singular value) โดยจะได้ค่าซิงกูลาร์วอลูออกมาหลายค่าด้วยกัน จำนวนของซิงกูลาร์วอลูที่ได้ขึ้นอยู่กับมิติของเมตริกซ์ \bar{C}_s ค่าคอนดิชันนัมเบอร์ก็คือ อัตราส่วนระหว่างซิงกูลาร์วอลูที่มากที่สุดต่อซิงกูลาร์วอลูที่น้อยที่สุด เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Cond(\bar{C}_s) = \frac{\max . \sin gularvalue}{\min . \sin gularvalue} \quad (3.9)$$

โดยคอนดิชันนัมเบอร์ที่ดีที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 1 และจากสมการที่ (3.9) จะเห็นว่าค่าคอนดิชันนัมเบอร์นั้นจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ โดยค่าคอนดิชันนัมเบอร์นั้นเป็นดัชนีที่แสดงถึงความผิดพลาดในการวัดแรง ยิ่งมีค่าใกล้ 1 เท่าไรก็แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงมีความผิดพลาดในการวัดแรงน้อยเท่านั้น

นอกจากคอนดิชันนัมเบอร์แล้วยังต้องคำนึงถึงความแข็งแรง (stiffness) [3, 4] ของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงด้วย เนื่องจากเราต้องนำอุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่ได้ไปติดไว้กับหุ่นยนต์ ถ้าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่คำนวณออกมาเสียรูปมากเกินไปเมื่อมีแรงหรือโมเมนต์ภายนอกมากกระทำ ก็จะทำให้ตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผิดพลาดไปจากที่ต้องการมากเกินไป (เมื่อตอนปลายแขนสัมผัสกับชิ้นงาน) อันจะมีผลทำให้การควบคุมแขนกลเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ซึ่งอาจจะกำหนดไว้ว่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงจะเสียรูปได้ไม่เกิน 25 ไมครอนหรือบิดไปไม่เกิน 0.002 องศา [3, 5] ทั้งนี้จะเห็นว่าความแข็งแรงกับความไว (sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนั้นมีความสัมพันธ์ในทางที่ตรงกันข้ามกัน คือ ถ้าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงมีความแข็งแรงมากความไวก็จะน้อยลงในทางกลับกันถ้าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงมีความไวมากความแข็งแรงก็จะต้องน้อยลง อันจะมีผลทำให้หุ่นยนต์ที่ติดอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนั้นมีความแข็งแรงน้อยลงไปด้วย

ทางด้านพลศาสตร์ (dynamics) จะต้องรู้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วไปควรจะมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความถี่ที่หุ่นยนต์ทำงาน [3] เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้โครงสร้างเกิดการไหวอันเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น และทรานสดิวเซอร์ที่ใช้กับโครงสร้างที่ออกแบบนี้คือ สเตรอนเกจ

ท้ายที่สุดในการออกแบบโครงสร้างเราจะต้องพิจารณาถึงรูปร่างที่เป็นไปได้ในการสร้างด้วย เพราะบางรูปร่างอาจจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลยเนื่องจากไม่มีเครื่องมือหนักที่จะใช้ทำ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงความยากง่ายของการติดตั้งสเตรนเกจเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเช่นกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การวัดความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งทางด้านวิศวกรรม ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดความเค้นและความเครียด โดยจะทำการแปลงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งก็คือ ความต่างศักย์นั่นเอง การจะนำสเตรนเกจไปใช้วัดความเครียดนั้นก็จะต้องนำสเตรนเกจไปติดบริเวณที่จะวัดความเครียด เพื่อให้สเตรนเกจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามโครงสร้างที่มันติดอยู่ เมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัวเกิดขึ้นก็จะทำให้ความต้านทานของตัวมันเองเปลี่ยนไป โดยสเตรนเกจก็ถือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อมีการยืดหรือหดตัวซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (3.10)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.10)$$

โดย ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะ(resistivity of material)

A คือ พื้นที่หน้าตัด

L คือ ความยาว

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า

ส่วนค่าความไวของสเตรนเกจ (สำหรับสเตรนเกจจะเรียกว่า เกจแฟกเตอร์ (gauge factor)) จะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (3.11)

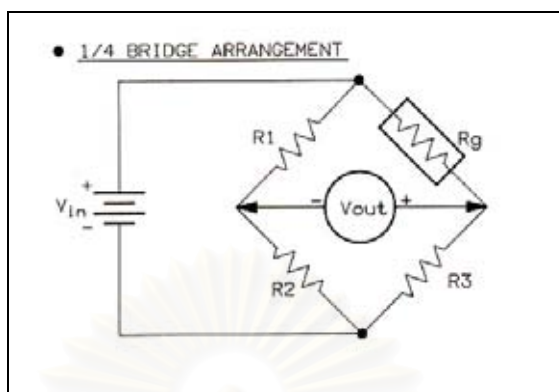
$$GF = \frac{(\Delta R / R)}{(\Delta L / L)} = \frac{(\Delta R / R)}{\epsilon} \quad (3.11)$$

โดย GF คือ เกจแฟกเตอร์, R คือ ความต้านทานเริ่มต้น, ΔR คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป

L คือ ค่าความยาวเริ่มต้น, ΔL คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไป, ϵ คือ ความเครียด

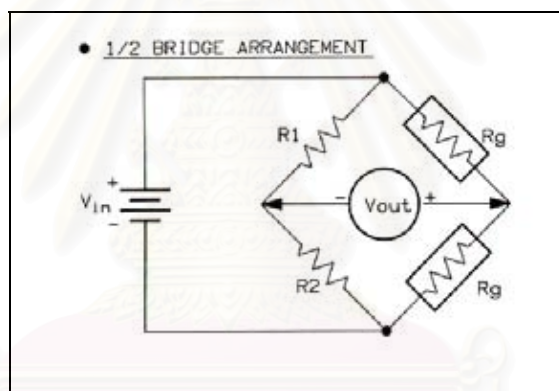
จากสมการที่ (3.11) จะเห็นว่าถ้ารู้ค่า $\Delta R / R$ ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความเครียดได้ เนื่องจาก GF เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามวัสดุที่ใช้ในการทำสเตรนเกจ โดยค่า $\Delta R / R$ นี้สามารถวัดได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่เรียกว่า วงจรวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge circuit) ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ซึ่งมีค่าน้อย) ไปเป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้าซึ่งสามารถที่จะทำการขยายสัญญาณได้ จากความต่างศักย์ขาออกที่วัดได้นี้และความต่างศักย์ขาเข้าที่รู้ค่า ก็จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเครียดดังสมการที่แสดงในตารางในภาคผนวก ข. ซึ่งจะมีให้เลือกใช้หลายสมการขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้ โดยวงจรวีทสโตนบริดจ์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. แบบควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge) จะแสดงดังรูปที่ 3.3



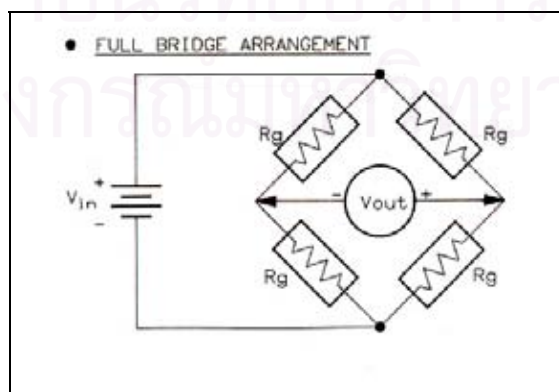
รูปที่ 3.3 วงจรวัดสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์

2. แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge) จะแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์

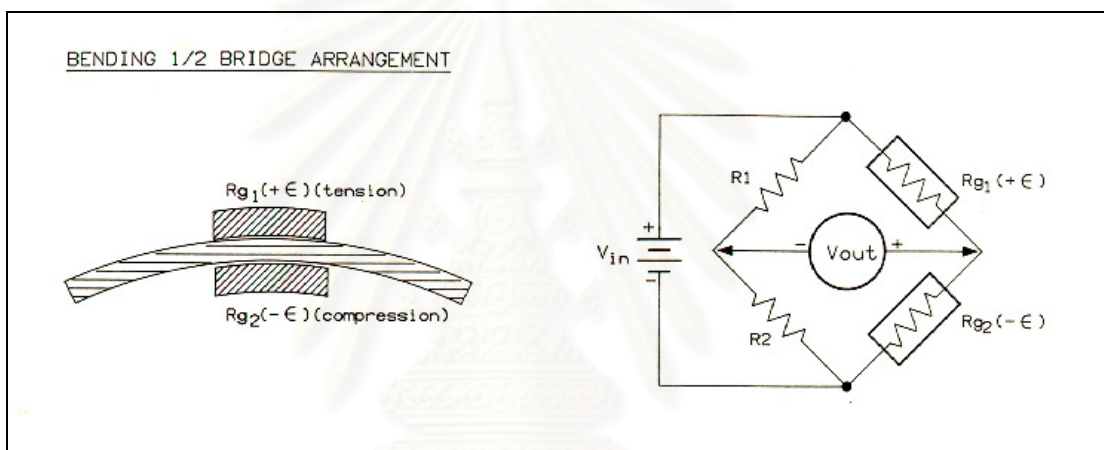
3. แบบฟูลบริดจ์ (full bridge) จะแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรวัดสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์

ซึ่งวงจรทั้ง 3 แบบก็จะมีรายละเอียดปลีกย่อยในส่วนของการจัดวางสเตรนเกจ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เช่น จะใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงดัด กับ ใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงในแนวแกน ก็จะมีลักษณะการจัดวางสเตรนเกจและการต่อวงจรที่ต่างกัน (ตารางแสดงการจัดวางสเตรนเกจและวงจรที่เหมาะสมกับงานจะแสดงในภาคผนวก ข.)

สำหรับในการนำไปใช้วัดค่าความเครียดในอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้เราจะใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์แบบที่ใช้วัดแรงดัด เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างจะเกิดความเครียดมากที่สุดเมื่อลักษณะของแรงเป็นแรงดัด โดยลักษณะวงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงดัดและลักษณะการติดสเตรนเกจจะแสดงดังรูปที่ 3.6

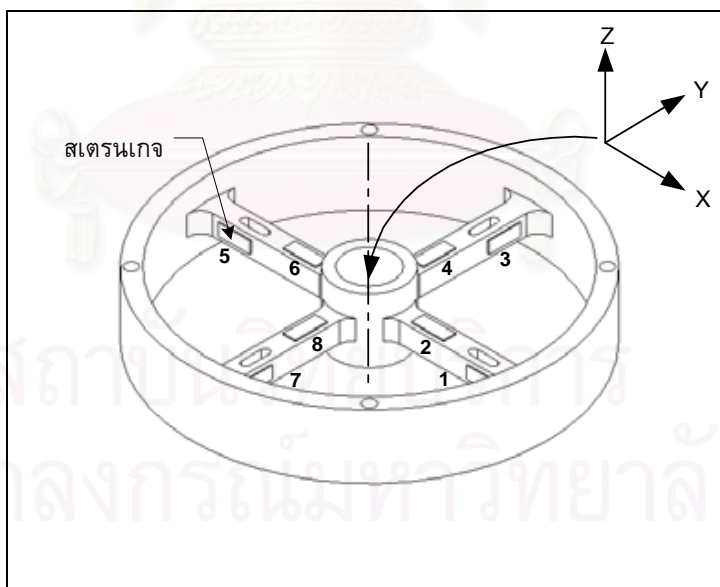


รูปที่ 3.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงดัดและลักษณะการติดสเตรนเกจ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าสเตรนเกจตัวหนึ่งจะยึดตัวในขณะที่สเตรนเกจอีกตัวหนึ่งจะหลุดตัว ก็หมายถึงสเตรนเกจตัวหนึ่งจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกตัวหนึ่งจะมีความต้านทานลดลง จึงทำให้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์นี้มีค่าความต่างศักย์ขาออกเป็น 2 เท่าของเมื่อใช้วงจรเป็นแบบควอเตอร์บริดจ์ นอกจากนี้ยังมีผลดีในเรื่องช่วยชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยวงจรแบบนี้จะใช้วัดความเครียดที่เกิดเมื่อโครงสร้างดัดเท่านั้น ไม่สามารถวัดความเครียดเมื่อโครงสร้างเกิดการยืดหรือหดตัวในแนวแกนได้

ดังนั้นหากลักษณะการติดสเตรนเกจบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเป็นดังรูปที่ 3.7 และใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้วัดความเครียดเมื่อโครงสร้างดัดหรือโก่งตัวเท่านั้น ก็จะสามารถบอกชุดสเตรนเกจที่เป็นชุดสเตรนเกจหลักที่จะใช้วัดแรงหรือโมเมนต์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- แรงในแนวแกน x ใช้สเตรนเกจชุดที่ 3 และ 7 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน x มากจะทำ
- แรงในแนวแกน y ใช้สเตรนเกจชุดที่ 1 และ 5 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน y มากจะทำ
- แรงในแนวแกน z ใช้สเตรนเกจชุดที่ 2 4 6 และ 8 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน z มากจะทำ
- โมเมนต์รอบแกน x ใช้สเตรนเกจชุดที่ 4 และ 8 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีโมเมนต์รอบแกน x มากจะทำ
- โมเมนต์รอบแกน y ใช้สเตรนเกจชุดที่ 2 และ 6 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีโมเมนต์รอบแกน y มากจะทำ
- โมเมนต์รอบแกน z ใช้สเตรนเกจชุดที่ 1 3 5 และ 7 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าโครงสร้างจะเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีโมเมนต์รอบแกน z มากจะทำ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของการติดสเตรนเกจและแกนสมมุติบนโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

โดยในรูปที่ 3.7 จะใช้สเตรนเกจทั้งหมด 8 ชุดชุดละ 2 ตัว ต่อเป็นวงจรวัดแบบฮาล์บริดจ์โดยชุดที่ 2 4 6 และ 8 จะติดที่ผิวบนและล่างของแกน ส่วนสเตรนเกจชุดที่ 1 3 5 และ 7 จะติดที่ผิวด้านข้างของแกน

บทที่ 4

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์นั้นเกี่ยวข้องกับการคำนวณต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะต้องเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการต่าง ๆ ทั้งในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) หรือในรูปสมการอินทิกรัล (integral equation) ซึ่งก็มีหลายรูปแบบแล้วแต่ลักษณะปัญหาหรืองานแต่ละงาน การที่จะแก้ระบบสมการเหล่านี้เพื่อให้ได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) นั้นทำได้ยากมากหรืออาจไม่สามารถหาได้ จึงได้มีการนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดเวลาในการคำนวณ ช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ให้เป็นไปอย่างรวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่าย และเมื่อเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีแนวโน้มว่าจะมีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยมากขึ้น

4.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]

ก่อนอื่นจะต้องแบ่งลักษณะของปัญหาที่จะคำนวณ ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (elements) โดยในแต่ละเอลิเมนต์ก็จะมีฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation function) เพื่อใช้แสดงถึงปริมาณที่ต่อเนื่องกัน (continuous quantity) ต่อมาก็ทำการประยุกต์สมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation) ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาลงไปในแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเอลิเมนต์เหล่านี้จะมีจุดที่เชื่อมต่อกันที่เรียกว่า จุดต่อ (nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้คำนวณหาค่าตัวแปรตาม (dependent variables) ที่ต้องการ จากนั้นนำระบบสมการของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกันให้เป็นระบบสมการชุดใหญ่ และเมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของปัญหาลงไป ก็จะทำให้สามารถแก้ระบบสมการรวมทำให้รู้ค่าตัวแปรตามที่จุดต่อต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ส่วนตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่อ นั้นสามารถหาได้โดยการใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่เลือกใช้ต่อไป

จะเห็นว่าวิธีการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คำตอบที่ได้ของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องไปกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะเริ่มต้นจากการพิจารณาที่แต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะต้องสอดคล้องไปกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ก่อนที่จะนำรวมกันเป็นระบบสมการรวมแล้วจึงค่อยไปแก้ระบบสมการดังกล่าวต่อไป จึงเห็นได้ว่าความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของ

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation functions) ว่ามีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ส่วนสำคัญก็คือ การใส่ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขตและแรงภายนอกที่มากกระทำมีความถูกต้องหรือไม่

4.2 การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งแต่ละตัวก็จะมีลักษณะของการติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีความยากง่ายในการใช้งานต่างกันด้วย แต่ก็จะมีหลักการพื้นฐานในการคำนวณที่คล้ายคลึงกัน โดยก่อนที่จะสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ปัญหาได้จำเป็นจะต้องมีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาเสียก่อน โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการทำแบบจำลองนี้ออกเป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน

1. สร้างแบบจำลองชิ้นงาน โดยหากแบบจำลองชิ้นงานมีความซับซ้อนเราอาจจะสร้างแบบจำลองนี้จากโปรแกรม CAD แล้วจึงอิมพอร์ตเข้ามายังโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้
2. กำหนดคุณสมบัติของเอลิเมนต์และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
3. ทำการใส่เอลิเมนต์และจุดต่อลงไปในแบบจำลองชิ้นงาน
4. ใส่ค่าเงื่อนไขขอบเขตและแรงภายนอกที่มากกระทำ

หลังจากสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสร็จแล้วก็พร้อมที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไปโดยจะต้องเลือกวิธีวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับปัญหา

4.3 การวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก (linear static analysis)

ในโปรแกรมสำเร็จรูปก็จะมีอยู่หลายวิธีด้วยกันแต่ในการวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจู้แรงนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก ซึ่งก็เป็นการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่สุด โดยคำว่า ลิเนียร์ (linear) ก็หมายถึงว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณเช่น ค่าระยะเคลื่อนที่หรือค่าความเค้น จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงภายนอกที่มากกระทำ ส่วนคำว่า สแตติก (static) ก็หมายถึง แรงภายนอกที่กระทำนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือว่าการแปรผันไปตามเวลาจะมีผลน้อยมากดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้ โดยการวิเคราะห์แบบสแตติกนี้จะมีสมการดังนี้

$$[\mathbf{K}]\{u\} = \{f\} \quad (4.1)$$

โดยที่ K คือ สติฟเนสเมตริกซ์ (stiffness matrix) ของระบบซึ่งจะมีค่าขึ้นกับรูปร่างและคุณสมบัติต่าง ๆ

u คือ เวกเตอร์ของระยะเคลื่อนที่ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณออกมา

f คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกซึ่งเราจะเป็นผู้กำหนด

หลังจากที่ทำการคำนวณระยะเคลื่อนที่ได้แล้ว โปรแกรมก็จะใช้ค่าที่ได้นำไปคำนวณเป็นค่าอื่น ๆ เช่น ความเค้น ความเครียด แรงปฏิกิริยา ได้ต่อไป ซึ่งในการวิเคราะห์แบบนี้จะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าโครงสร้างจะอยู่ในสภาวะสมดุล หมายความว่า ในกรณีที่เอาแรงภายนอกที่มากกระทำออก ก็จะทำให้โครงสร้างกลับไปสู่ตำแหน่งเดิมเหมือนเมื่อตอนยังไม่เสียรูป

4.4 การวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมด (normal modes analysis)

การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) และโหมดเซพ (mode shape) ของโครงสร้าง โดยความถี่ธรรมชาติก็คือ ค่าความถี่ที่ทำให้โครงสร้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการสั่นได้ง่ายถ้าได้มีการรบกวนเกิดขึ้น และลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างที่ความถี่ธรรมชาตินั้นก็คือ โหมดเซพ ของโครงสร้างนั่นเอง โดยอาจเรียกการวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมดได้อีกแบบว่า การวิเคราะห์แบบเรียลไอเกนวอลูว์ (real eigenvalue analysis) โดยเราจะหาค่าไอเกนวอลูว์ (eigenvalue) และไอเกนเวกเตอร์ (eigenvector) เพื่อทำการแก้สมการการสั่นแบบอิสระ (undamped free vibration) ตามสมการที่ 4.2

$$[\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}]\{\phi_i\} = 0 \quad (4.2)$$

โดยที่ K คือ สติฟเนสเมตริกซ์ (stiffness matrix) ของระบบ

M คือ แมสเมตริกซ์ (mass matrix) ของระบบ

λ_i คือ ไอเกนวอลูว์

ϕ_i คือ ไอเกนเวกเตอร์

และค่าไอเกนวอลูว์กับความถี่ธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 4.3

$$f_i = \sqrt{\lambda_i} / 2\pi \quad (4.3)$$

โดยที่ f_i คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบ

4.4 ชนิดของเอลิเมนต์

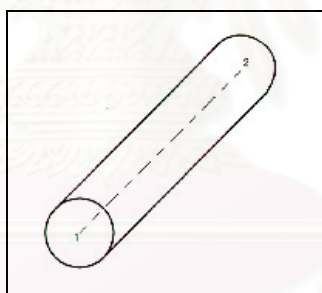
ในการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมนั้นก็มีส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้ผลการคำนวณที่น่าเชื่อถือมากขึ้น โดยอาจแบ่งชนิดของเอลิเมนต์ออกได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ แบบ 1 มิติ, แบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ

1. แบบ 1 มิติ (1D element)

เอลิเมนต์แบบนี้บางทีอาจเรียกว่า ไลน์เอลิเมนต์ (line element) เพราะมันก็คือความยาว ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันของจุดต่อ 2 จุด ซึ่งอาจจะเป็นเส้นโค้งหรือเส้นตรงก็ได้

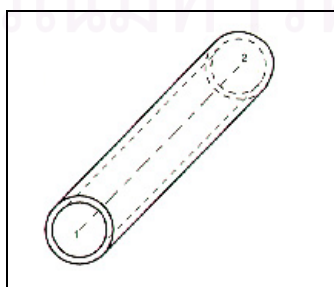
ตัวอย่างของเอลิเมนต์ประเภทนี้ได้แก่

- ร็อดเอลิเมนต์ (rod element) เป็นเอลิเมนต์ที่มีเพียงแกนเดียว สามารถรับแรงกดและแรงบิดได้แต่ไม่สามารถที่จะรับแรงดัดและแรงเฉือนได้ มักจะใช้จำลองโครงข้อหมุน (truss) ลักษณะจะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของร็อดเอลิเมนต์

- เอลิเมนต์แบบท่อ (tube element) จะมีลักษณะคล้ายกับร็อดเอลิเมนต์ เพียงแต่ตรงกลางของเอลิเมนต์แบบนี้จะกลวงมีลักษณะคล้ายท่อ มักจะใช้จำลองท่อ มีลักษณะดังรูปที่ 4.2

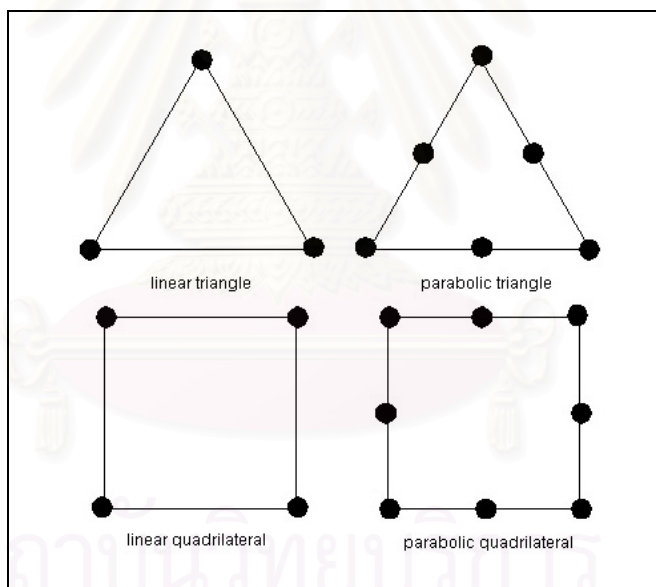


รูปที่ 4.2 ลักษณะเอลิเมนต์แบบท่อ

- เอลิเมนต์แบบท่อโค้ง (curved tube element) มีลักษณะคล้ายกับเอลิเมนต์แบบท่อเพียงแต่มีความโค้งเท่านั้น จะใช้จำลองข้อต่อหรือส่วนโค้งในระบบท่อ
- บาร์เอลิเมนต์ (bar element) เอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถรับแรงดึง, แรงกด, แรงบิด และแรงดัดได้ มักจะใช้จำลองโครงสร้างของคาน (beam)

2. แบบ 2 มิติ (2D element)

อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เพลนเอลิเมนต์ (plane element) เพราะเป็นการเชื่อมต่อของจุดต่อซึ่งอยู่บนระนาบเดียวกัน เอลิเมนต์แบบนี้จะถูกใช้เพื่อแสดงลักษณะโครงสร้างที่เป็นแผ่นหรือผนัง ลักษณะรูปร่างก็มีหลายแบบทั้งแบบสามเหลี่ยม 3 จุดต่อ, สี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ, สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ, สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ ดังรูปที่ 4.3 โดยรูปร่างที่ดีของเอลิเมนต์ควรจะเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 4.3 รูปร่างของเอลิเมนต์แบบ 2 มิติแบบต่าง ๆ

ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 2 มิติได้แก่

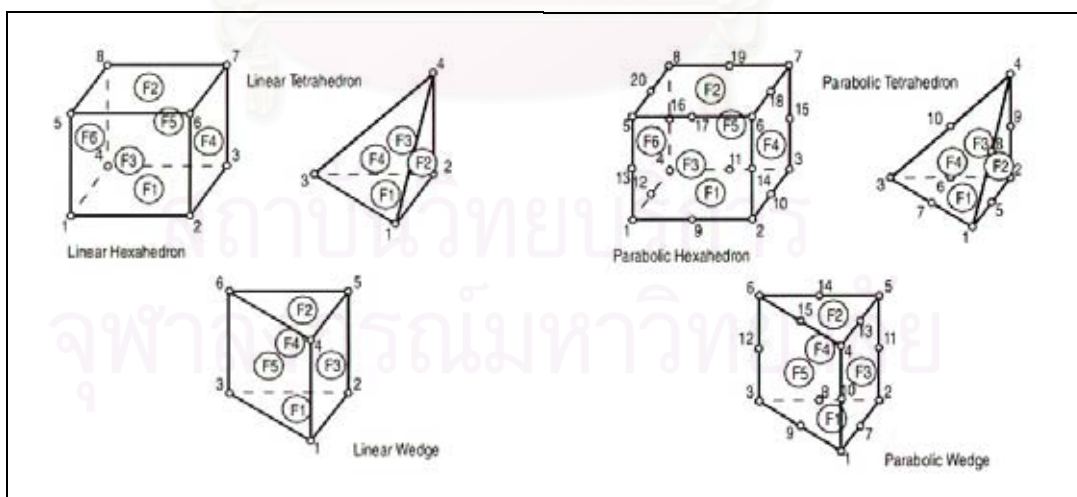
- เชียร์พานเอลิเมนต์ (shear panel element) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่สามารถรับได้แต่แรงเฉือนเท่านั้น เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้จำลองโครงสร้างที่ประกอบด้วยอีลาสติกชีท (elastic sheet) บาง ๆ

- เมมเบรนเอลิเมนต์ (membrane element) เป็นเอลิเมนต์ที่รับได้เฉพาะแรงตั้งฉากกับระนาบเท่านั้น โดยจะใช้จำลองอีลาสติคชีท (elastic sheet) บาง ๆ
- เบ็นดิงเอลิเมนต์ (bending element) เป็นเอลิเมนต์ที่รับได้เฉพาะแรงดัดเท่านั้น
- เพลทเอลิเมนต์ (plate element) เป็นเอลิเมนต์ที่สามารถรับได้ทั้งแรงเฉือน, แรงดัดและแรงตั้งฉาก โดยจะใช้จำลองโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยเพลท (plate) หรือเชล (shell)

3. แบบ 3 มิติ (3D element)

อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วอลุ่มเอลิเมนต์ (volume element) เพราะเป็นการเชื่อมของจุดต่อที่อยู่กันคนละระนาบ ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติได้แก่

- แอ็กซิสซิมเมตริกเอลิเมนต์ (axisymmetric element) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์แบบ 2 มิติที่ใช้แทนรูปทรงที่เกิดจากการหมุน เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้จำลองรูปทรงที่มีความสมมาตรรอบแกน ซึ่งทำให้แรงที่มากกระทำกับข้อจำกัด (constraint) ต้องมีความสมมาตรรอบแกนด้วย
- โซลิดเอลิเมนต์ (solid element) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ใช้จำลองโครงสร้าง 3 มิติทั่วไป ก็จะมีลักษณะรูปร่างหลายแบบดังรูปที่ 4.4 เช่น เตตระฮีดรอน (tetrahedron) ซึ่งมี 4 หน้า, เวจ (wedge) ซึ่งมี 5 หน้า, เฮกซะฮีดรอน (hexahedron) ซึ่งมี 6 หน้า



รูปที่ 4.4 รูปร่างต่าง ๆ ของโซลิดเอลิเมนต์

บทที่ 5

การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

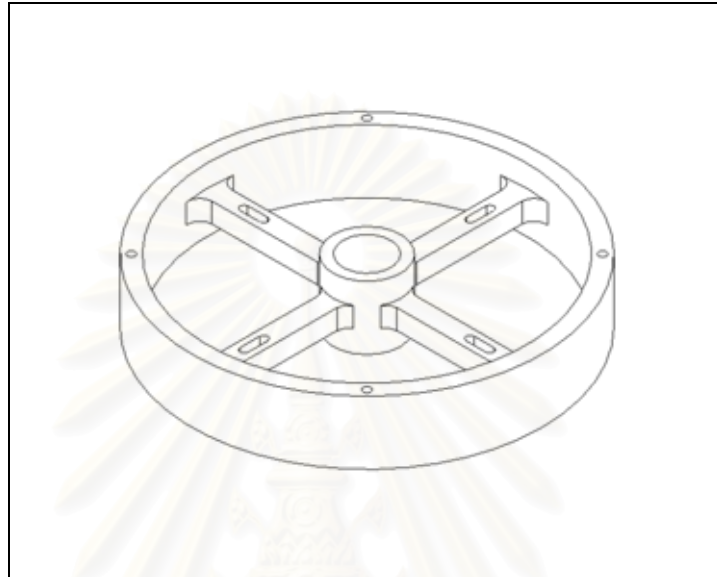
การนำโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ออกแบบมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำให้เราสามารถคาดคะเนได้ว่าโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงหลาย ๆ แบบที่ได้ออกแบบไว้ว่าแบบใดจะมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดแรงได้ดีกว่ากัน ทำให้ได้รู้ถึงขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่จะทำให้สามารถวัดแรงได้ดีที่สุด อีกทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อทำการทดลอง โดยในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง Sensor II [5] ที่เป็นตัวเท่ากับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ได้ทำการออกแบบขึ้นใหม่ ว่าโครงสร้างใหม่จะทำให้สามารถทำให้แรงได้ดีขึ้นหรือไม่

โดยขั้นต้นนั้นจะต้องวิเคราะห์โครงสร้าง Sensor II เสียก่อนว่าเมื่อมีแรงมากระทำในลักษณะต่าง ๆ แล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างไร และความเครียดที่ได้มีค่าเท่าไร ในที่นี้จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ชื่อ แนสแทรน (Nastran) เป็นตัววิเคราะห์ โดยก่อนที่จะทำการวิเคราะห์จะต้องรู้รูปร่าง ลักษณะเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) และโหลดที่มากระทำกับโครงสร้างให้ครบถ้วน ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้

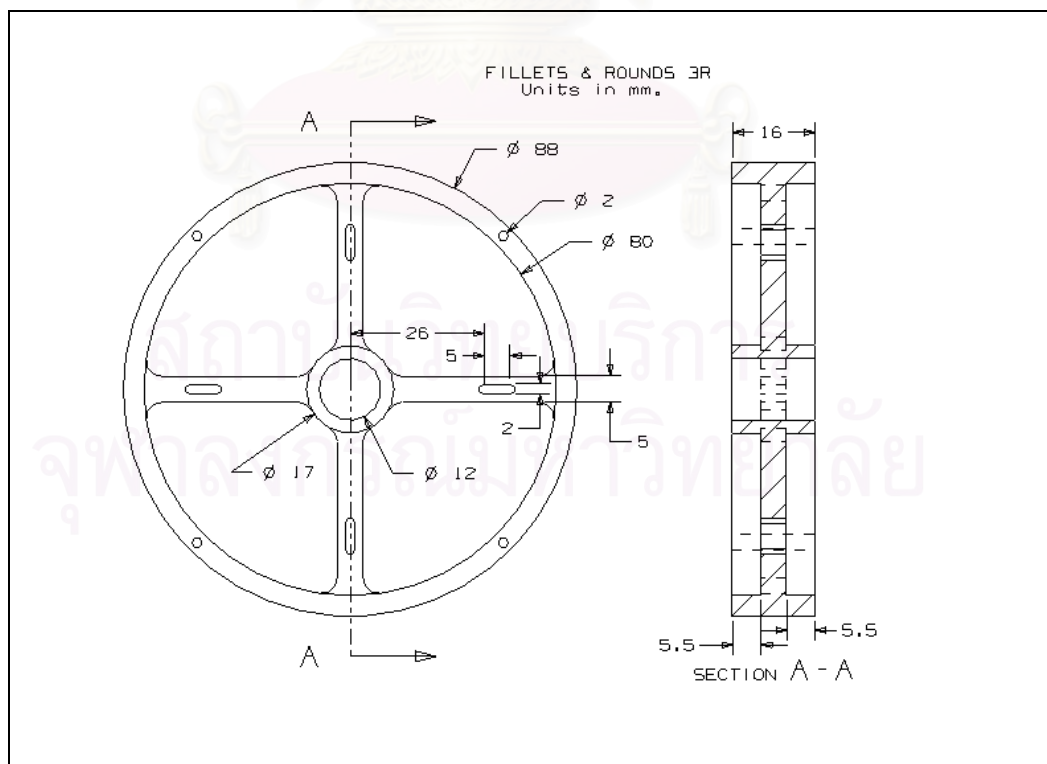
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงสร้าง Sensor II

โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Sensor II มีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



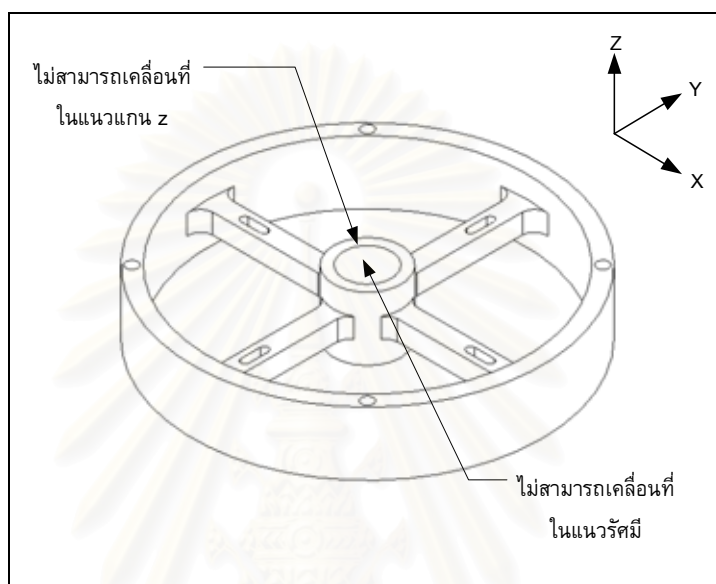
รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างของ Sensor II



รูปที่ 5.2 ขนาดของ Sensor II

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต

ที่รูตรงกลางของโครงสร้างมีไว้สำหรับเสียบเข้ากับเพลาดังนั้นผิวด้านในรูนั้นจะถูกจำกัดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวรัศมีได้ ส่วนผิวด้านบนและล่างของรูตรงกลางนั้นก็ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน z ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3

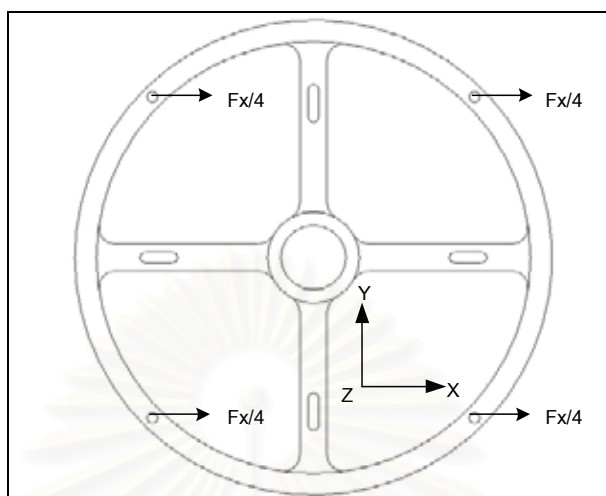


รูปที่ 5.3 ลักษณะเงื่อนไขขอบเขตของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง

ลักษณะของโหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

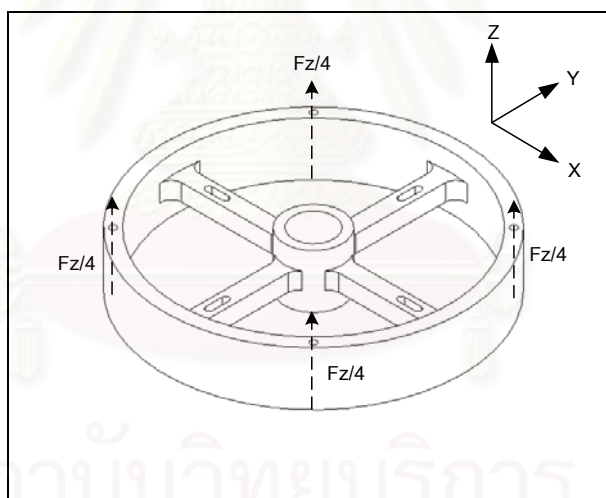
โหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้จะกระทำที่รูนี้่อดทั้ง 4 รูบริเวณด้านข้าง ทั้งนี้จะได้โหลดทั้งหมด 6 ลักษณะอันเป็นแรงและโมเมนต์ที่เราต้องการวัดคือ ใ้แรงในแนวแกน x y และ z และได้โมเมนต์รอบแกน x y และ z ตามลำดับ ทั้งนี้การใ้แรงในแนวแกน x และ y จะมีลักษณะเหมือนกัน เช่นเดียวกับการใ้โมเมนต์รอบแกน x และ y ก็จะมีลักษณะเหมือนกันเช่นกัน โดยการใ้โหลดบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

การใส่แรงในแนวแกน x จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.4



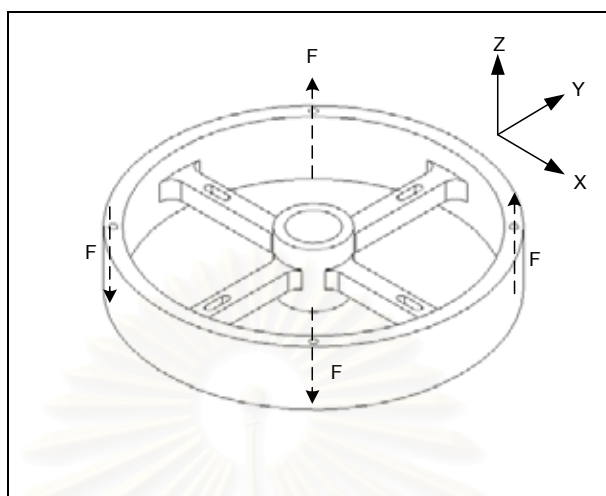
รูปที่ 5.4 ลักษณะการใส่แรงในแนวแกน x บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การใส่แรงในแนวแกน z จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.5



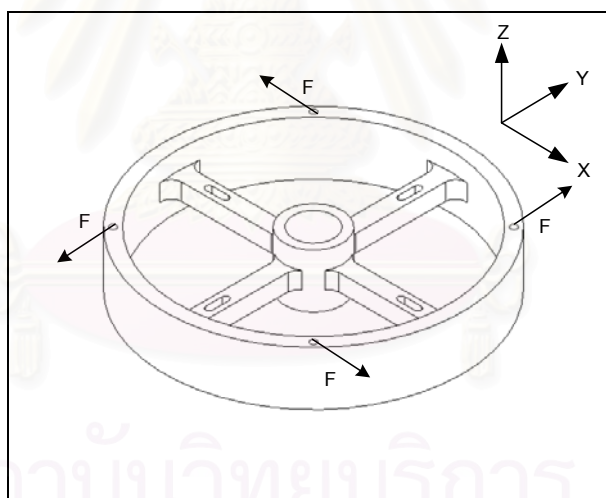
รูปที่ 5.5 ลักษณะการใส่แรงในแนวแกน z บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การใส่โมเมนต์รอบแกน x จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ลักษณะการใส่โมเมนต์รอบแกน x บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การใส่โมเมนต์รอบแกน z จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ลักษณะการใส่โมเมนต์รอบแกน z บนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างของ Sensor II

ในการวิเคราะห์นี้จะใช้เอลิเมนต์แบบเตตระฮีดรอน (tetrahedron) โดยสำหรับโครงสร้าง Sensor II วิเคราะห์โดยใช้จำนวนจุดต่อ 18020 จุดต่อประกอบกันเป็น 8511 เอลิเมนต์ สำหรับเงื่อนไขขอบเขตกับลักษณะของโหลดก็ให้เหมือนกันที่กล่าวมาแล้วข้างต้น วัสดุที่ใช้สร้างคือ อลูมิเนียม ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1

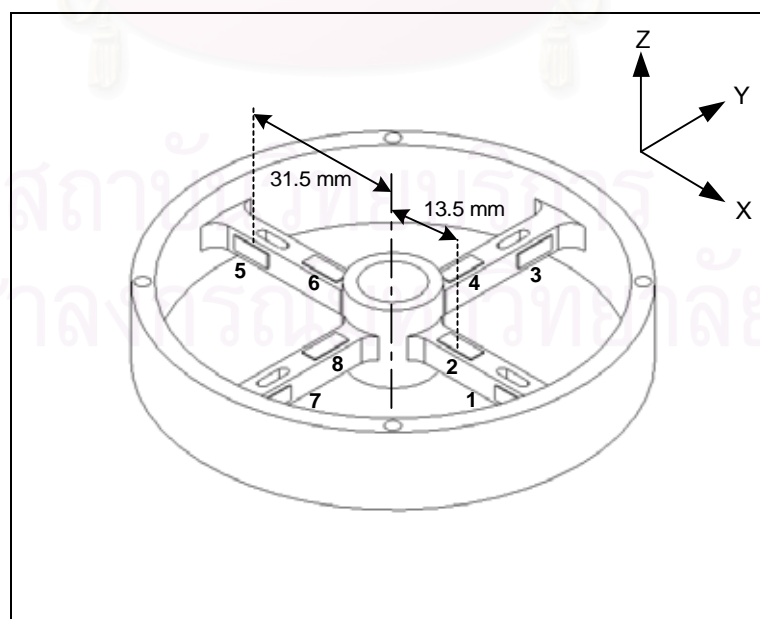
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของ Sensor II ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Sensor II ชนิดโหลด	ที่ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)	ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)	ความเครียด (μstrain/Nหรือμstrain/N.m)
Fx	3,7	0.094	0.067	1.313
Fy	1,5	0.094	0.067	1.313
Fz	2,4,6,8	0.275	0.132	2.095
Mx	4,8	30.168	10.556	174.743
My	2,6	30.168	10.556	174.743
Mz	1,3,5,7	17.301	6.649	56.475

โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ (5.1) ดังนี้

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2}{2}} \quad (5.1)$$

จากตารางที่ 5.1 ในช่อง “ที่ตำแหน่ง” จะแสดงถึง ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าความเครียดหลักที่เกิดจากโหลดแต่ละชนิด โดยจะต้องดูประกอบกับรูปที่ 5.8 โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าชุดสเตรนเกจที่ 2 4 6 และ 8 จะติดอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง 13.5 มม. ส่วนชุดสเตรนเกจที่ 1 3 5 และ 7 จะติดอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง 31.5 มม.



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของสเตรนเกจที่ติดบน Sensor II

จากตารางที่ 5.1 จะได้เมตริกซ์ C_s ของโครงสร้างแบบ Sensor II ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & -1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & -174.743 & 0 \\ 1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 174.743 & 0 & 0 \\ 0 & 1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & 174.743 & 0 \\ -1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & -174.743 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalization) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.8) จะได้เมตริกซ์ \bar{C}_s ดังนี้ (สำหรับตัวอย่างการคำนวณให้ดูในภาคผนวก ค.)

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & -1.313 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & -2.576 & 0 \\ 1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 2.576 & 0 & 0 \\ 0 & 1.313 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & 2.576 & 0 \\ -1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & -2.576 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ \bar{C}_s ทำการหาค่าชิงกูลาร์วอลูยูได้ดังนี้

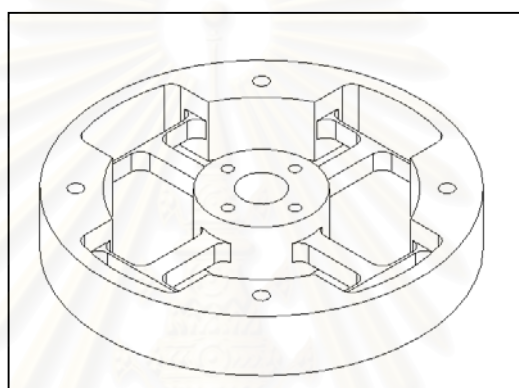
$$\sigma_1 = 4.1900 \quad \sigma_2 = 3.6424 \quad \sigma_3 = 3.6424 \quad \sigma_4 = 1.8569 \quad \sigma_5 = 1.8569 \quad \sigma_6 = 1.6648$$

ดังนั้นจะหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของ Sensor II ได้เท่ากับ $4.1900/1.6648 = 2.5168$ และค่าความถี่ธรรมชาติตัวแรก (1^{st} natural frequency) หาได้เท่ากับ 882.90 Hz

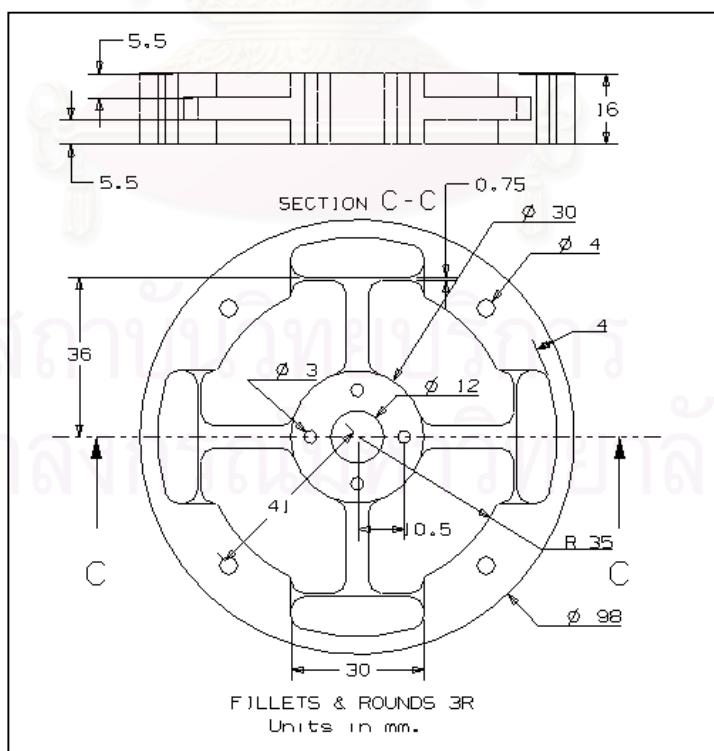
การพัฒนาเพื่อหาโครงสร้างแบบใหม่

ต่อไปจะเป็นการหาโครงสร้างแบบใหม่เพื่อที่จะทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดีขึ้นกว่าโครงสร้างแบบ Sensor II โดยมีแนวคิดหลักที่ว่าต้องการให้โครงสร้างแบบใหม่นี้สามารถวัดแรงในแนวแกน x และแกน y ได้ดีขึ้นกว่าเดิม จากคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ 3.1 และ 3.7 จะเห็นว่าสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์นี้อยู่ที่ว่าค่าความเครียดที่กำหนดอยู่ในเมตริกซ์นั้นเป็นค่าความเครียดที่เกิดจากโมเมนต์ดัดเท่านั้น โดยพยายามให้แรงกดและแรงดึงที่มีผลต่อค่าความเครียดเป็นศูนย์ ดังนั้นโครงสร้างใหม่ที่ออกแบบใหม่นี้จะต้อง

พยายามลดผลกระทบจากแรงกดและแรงดึงที่มีต่อค่าความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจให้น้อยที่สุด ในขั้นต้นจะออกแบบให้โครงสร้างแบบใหม่มีลักษณะดังรูปที่ 5.9 จากรูปแบบที่ออกแบบใหม่นี้จะเห็นว่าโครงจะมีเพิ่มโลหะแผ่นบางที่ปลายข้างหนึ่งของก้านที่ใช้ติดตั้งชุดสเตรนเกจ วัดคุณสมบัติหลักของแผ่นบางนี้ก็เพื่อที่จะลดผลกระทบเนื่องจากแรงกดและแรงดึงที่จะเกิดขึ้นที่ก้านดังกล่าว เมื่อมีแรงกดและแรงดึงเกิดขึ้นการเสียรูป (deformation) จะไปปรากฏที่ตรงแผ่นบางแทนที่จะเกิดขึ้นที่ก้านของอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งทำให้ข้อสมมติฐานที่ว่าความเครียดที่วัดได้นั้นจะเป็นความเครียดเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดเท่านั้นเป็นจริงมากขึ้น รูปแบบใหม่จะมีขนาดในเบื้องต้นดังรูปที่ 5.10

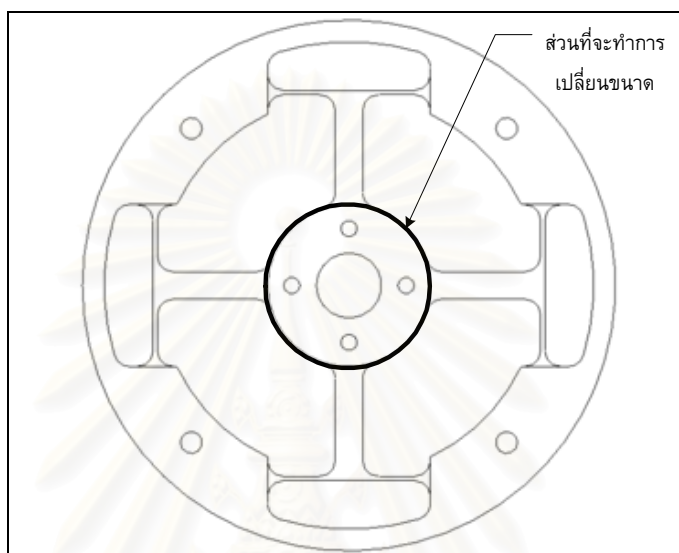


รูปที่ 5.9 รูปร่างเบื้องต้นของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ออกแบบใหม่



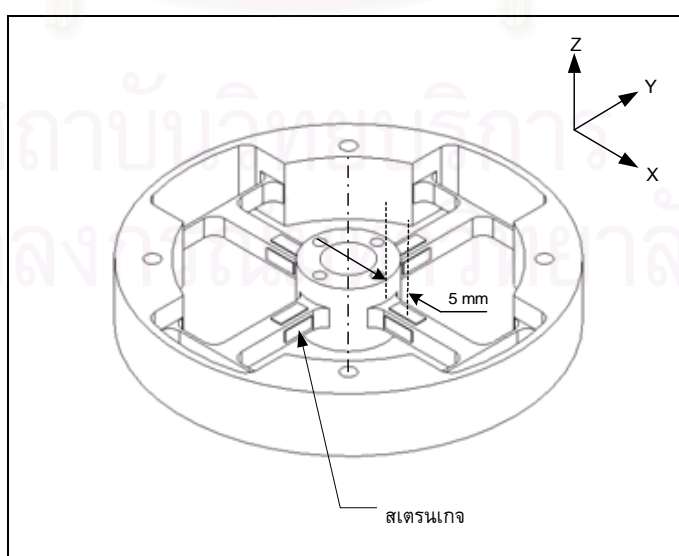
รูปที่ 5.10 ขนาดเบื้องต้นของอุปกรณ์วัดแรงที่ออกแบบใหม่

ในขั้นแรกจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวนด้านในว่ามีผลทำให้เกิดความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเพียงใด โดยที่จะกำหนดให้ขนาดของส่วนอื่น ๆ คงที่ ยกเว้นในส่วนของวงแหวนด้านในดังรูปที่ 5.11 ที่จะถูกเปลี่ยนขนาด ส่วนผลจะแสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3



รูปที่ 5.11 แสดงส่วนของวงแหวนด้านใน

สำหรับตำแหน่งที่จะใช้วัดความเครียดนั้นจะวัดจากจุดที่อยู่ห่างจากขอบของวงแหวนในออกไปอีก 5 มม. อันเป็นจุดที่มีแนวโน้มที่จะเกิดความเครียดได้สูงสุด ซึ่งสามารถดูจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเป็นจุดที่สามารถติดตามเคจด้วยดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงจุดที่จะวัดความเครียดโดยจะอยู่ห่างจากขอบวงแหวนใน 5 มม.

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดของวงแหวนด้านใน

ขนาดวงแหวนใน ชนิดโหนดที่ใช้	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด			ความเค้นมากที่สุด			ความเครียด		
	(Micron/NหรือMicron/N.m)			(Mpa/NหรือMpa/N.m)			(μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)		
	22 mm	26 mm	30 mm	22 mm	26 mm	30 mm	22 mm	26 mm	30 mm
Fx	0.349	0.304	0.258	0.304	0.260	0.221	3.175	3.183	3.143
Fy	0.349	0.304	0.258	0.304	0.260	0.221	3.175	3.183	3.143
Fz	0.464	0.368	0.293	0.210	0.175	0.153	3.317	2.983	2.643
Mx	32.503	25.955	20.737	10.740	9.049	7.988	170.220	154.955	138.797
My	32.503	25.955	20.737	10.740	9.049	7.988	170.220	154.955	138.797
Mz	14.094	10.893	8.273	6.162	5.328	4.642	93.814	83.530	74.082

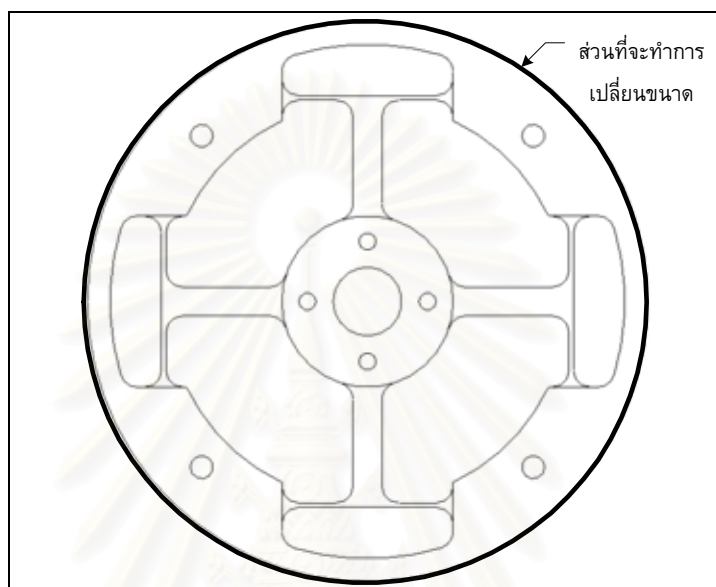
โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดของวงแหวนในเปลี่ยนไป

ขนาดวงแหวนใน ชนิดโหนดที่ใช้	ความเครียด			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด	
	(μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)			(%)	
	22 mm	26 mm	30 mm	จาก 30 mm ไปเป็น 26	จาก 26 mm ไปเป็น 22
Fx	3.175	3.183	3.143	1.260%	-0.251%
Fy	3.175	3.183	3.143	1.260%	-0.251%
Fz	3.317	2.983	2.643	12.866%	11.202%
Mx	170.220	154.955	138.797	11.641%	9.851%
My	170.220	154.955	138.797	11.641%	9.851%
Mz	93.814	83.530	74.082	12.754%	12.313%

จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นว่าเมื่อขนาดของวงแหวนในมีขนาดเล็กลงจะไม่ทำให้เกิดความเครียดเปลี่ยนแปลงนักเมื่อชนิดโหนดที่ใช้คือ Fx และ Fy แต่จะทำให้ความเครียดมากขึ้นพอสมควรเมื่อโหนดเป็น Fz Mx My และ Mz ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ขนาดของวงแหวนในหรืออีกนัยหนึ่งก็คือความหนาของวงแหวนในจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการวัดแรง Fx และ Fy ดีขึ้น (ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการปรับปรุง) แต่จะทำให้วัดโหนดที่เหลือได้ดีขึ้น ดังนั้นในที่นี้จะเลือกให้เปลี่ยนขนาดวงแหวนในจาก 30 มม. ให้เหลือ 22 มม. เพื่อประโยชน์ในด้านวัดโหนด Fz Mx My และ Mz ได้ดีขึ้นและที่สำคัญจะได้มีพื้นที่สำหรับติดตั้งเตรนเกจเพิ่มขึ้นด้วย

ต่อมาจะดูว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวนด้านนอกว่ามีผลทำให้เกิดความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเพียงใด โดยที่จะกำหนดให้ขนาดของส่วนอื่น ๆ คงที่ยกเว้นในส่วนของวงแหวนด้านนอกดังรูปที่ 5.13 ที่จะถูกเปลี่ยนแปลง ส่วนผลจะแสดงในตารางที่ 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.13 แสดงส่วนของวงแหวนด้านนอก

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวนด้านนอก

ขนาดวงแหวนนอก ชนิดโหลดที่ได้	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)			ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)			ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)		
	94 mm	98 mm	102 mm	94 mm	98 mm	102 mm	94 mm	98 mm	102 mm
	Fx	0.356	0.349	0.348	0.291	0.304	0.305	3.178	3.175
Fy	0.356	0.349	0.348	0.291	0.304	0.305	3.178	3.175	3.160
Fz	0.484	0.464	0.459	0.210	0.210	0.210	3.326	3.317	3.318
Mx	31.557	32.503	33.648	10.720	10.740	10.744	170.336	170.220	170.259
My	31.557	32.503	33.648	10.720	10.740	10.744	170.336	170.220	170.259
Mz	13.997	14.094	14.597	6.216	6.162	6.149	95.440	93.814	93.273

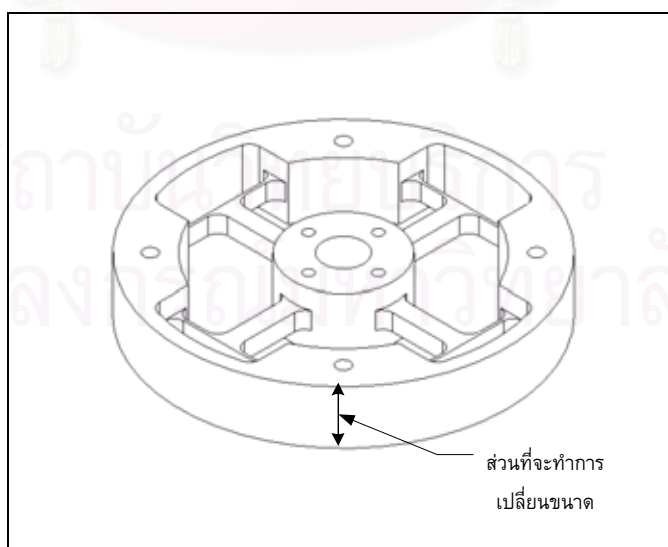
โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดของวงแหวนนอกเปลี่ยนไป

ขนาดวงแหวนนอก ชนิดโหลดที่ใช้	ความเครียด ($\mu\text{strain}/\text{N}$ หรือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด (%)	
	94 mm	98 mm	102 mm	จาก102 mmไปเป็น 98	จาก 98 mmไปเป็น 94
Fx	3.178	3.175	3.160	0.475%	0.117%
Fy	3.178	3.175	3.160	0.475%	0.117%
Fz	3.326	3.317	3.318	-0.024%	0.277%
Mx	170.336	170.220	170.259	-0.023%	0.068%
My	170.336	170.220	170.259	-0.023%	0.068%
Mz	95.440	93.814	93.273	0.580%	1.733%

จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นว่าการเปลี่ยนขนาดของวงแหวนนอกหรืออีกนัยหนึ่งก็คือความหนาของวงแหวนนอก แทบจะไม่มีผลทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ชนิดของโหลด ในที่นี้จะเลือกให้ขนาดวงแหวนนอกเป็น 98 มม.

ต่อมาจะดูว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของโครงสร้างว่ามีผลทำให้เกิดความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด โดยที่จะกำหนดให้ขนาดของส่วนอื่น ๆ คงที่ ยกเว้นในส่วนของความหนาดังรูปที่ 5.14 ที่จะถูกเปลี่ยนขนาด ส่วนผลจะแสดงในตารางที่ 5.6 และ 5.7



รูปที่ 5.14 แสดงส่วนความหนาของโครงสร้าง

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความหนาของโครงสร้าง

ขนาดความหนา / หน่วยโหลดที่ใส่	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด			ความเค้นมากที่สุด			ความเครียด		
	(Micron/N หรือ Micron/N.m)			(Mpa/N หรือ Mpa/N.m)			(μ strain/N หรือ μ strain/N.m)		
	5 mm	10 mm	16 mm	5 mm	10 mm	16 mm	5 mm	10 mm	16 mm
Fx	0.374	0.360	0.356	0.298	0.289	0.291	3.140	3.177	3.178
Fy	0.374	0.360	0.356	0.298	0.289	0.291	3.140	3.177	3.178
Fz	0.850	0.548	0.484	0.245	0.208	0.210	3.397	3.326	3.326
Mx	40.274	32.607	31.557	11.287	10.453	10.720	162.592	168.922	170.336
My	40.274	32.607	31.557	11.287	10.453	10.720	162.592	168.922	170.336
Mz	15.479	14.323	13.997	6.281	6.283	6.216	98.135	96.263	95.440

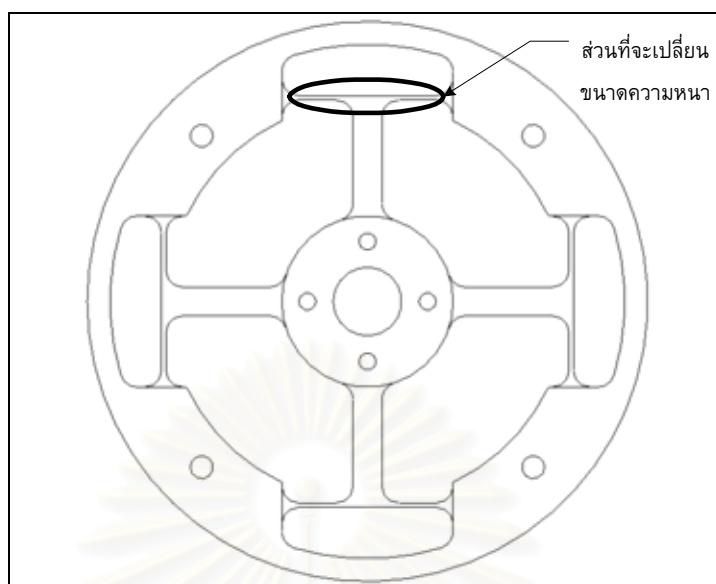
โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดความหนาของโครงสร้างเปลี่ยนไป

ขนาดความหนา / หน่วยโหลดที่ใส่	ความเครียด			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด	
	(μ strain/N หรือ μ strain/N.m)			(%)	
	5 mm	10 mm	16 mm	จาก 16 mm ไปเป็น 10 mm	จาก 10 mm ไปเป็น 5 mm
Fx	3.140	3.177	3.178	-0.031%	-1.171%
Fy	3.140	3.177	3.178	-0.031%	-1.171%
Fz	3.397	3.326	3.326	0.009%	2.117%
Mx	162.592	168.922	170.336	-0.830%	-3.747%
My	162.592	168.922	170.336	-0.830%	-3.747%
Mz	98.135	96.263	95.440	0.863%	1.944%

จากตารางที่ 5.6 และ 5.7 จะเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดความหนาของโครงสร้าง ความเครียดที่วัดได้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากสำหรับทุกชนิดโหลดที่ใส่ ดังนั้นเราจึงเลือกให้ความหนาของโครงสร้างมีค่า 16 มม. เพราะจะทำให้ระยะเคลื่อนที่มากที่สุดมีค่าน้อยลง ซึ่งก็หมายถึงโครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นนั่นเอง

ต่อมาจะดูว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของครีป จะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด โดยที่จะกำหนดให้ขนาดของส่วนอื่น ๆ คงไว้ในส่วนของครีปดังรูปที่ 5.15 ที่จะถูกเปลี่ยนขนาด ส่วนผลจะแสดงในตารางที่ 5.8 และ 5.9



รูปที่ 5.15 แสดงส่วนความหนาของครีป

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความหนาของครีป

ความหนาครีป ชนิดโหลดที่ใส่	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)			ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)			ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)		
	0.75mm	1 mm	2 mm	0.75mm	1 mm	2 mm	0.75mm	1 mm	2 mm
	Fx	0.356	0.245	0.087	0.291	0.227	0.088	3.178	2.245
Fy	0.356	0.245	0.087	0.291	0.227	0.088	3.178	2.245	0.904
Fz	0.484	0.461	0.373	0.210	0.205	0.177	3.326	3.223	2.672
Mx	31.557	30.709	28.023	10.720	10.660	10.369	170.336	168.758	161.072
My	31.557	30.709	28.023	10.720	10.660	10.369	170.336	168.758	161.072
Mz	13.997	13.575	11.973	6.216	6.154	5.901	95.440	93.920	86.990

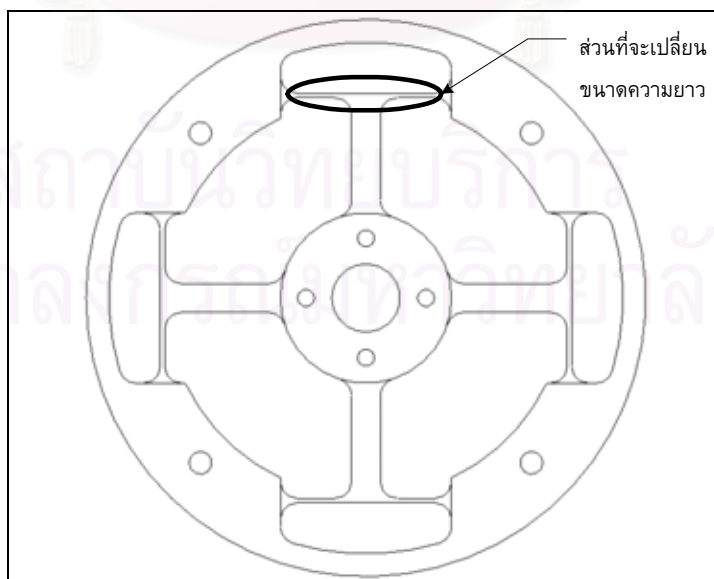
โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดความหนาของครีบบเปลี่ยนไป

ความหนาของครีบบ ชนิดโหลดที่ใช้	ความเครียด ($\mu\text{strain}/\text{N}$ หรือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด (%)	
	0.75mm	1 mm	2 mm	จาก 2 mm ไปเป็น 1 mm	จาก 1 mm ไปเป็น 0.75
Fx	3.178	2.245	0.904	148.368%	41.577%
Fy	3.178	2.245	0.904	148.368%	41.577%
Fz	3.326	3.223	2.672	20.621%	3.193%
Mx	170.336	168.758	161.072	4.772%	0.935%
My	170.336	168.758	161.072	4.772%	0.935%
Mz	95.440	93.920	86.990	7.966%	1.618%

จากตารางที่ 5.8 และ 5.7 จะเห็นว่า การเปลี่ยนขนาดความหนาของครีบบจะทำให้ความเครียดเปลี่ยนไปมาก โดยถ้าความหนาของครีบบลดลงจะทำให้สามารถวัดความเครียดอันเกิดจากโหลดชนิด Fx และ Fy เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับโหลดชนิดที่เหลือ ดังนั้นจะเลือกให้ขนาดความหนาของครีบบเป็น 0.75 มม.

ท้ายสุดจะดูว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของครีบบ จะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด โดยที่จะกำหนดให้ขนาดของส่วนอื่น ๆ คงที่ ยกเว้นในส่วนของครีบบดังรูปที่ 5.16 ที่จะถูกเปลี่ยนขนาด ส่วนผลจะแสดงในตารางที่ 5.10 และ 5.11



รูปที่ 5.16 แสดงส่วนความยาวของครีบบ

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของครีป

ความยาวครีป ชนิดโหนดที่ใส่	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด			ความเค้นมากที่สุด			ความเครียด		
	(Micron/NหรือMicron/N.m)			(Mpa/NหรือMpa/N.m)			(μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)		
	20 mm	25 mm	30 mm	20 mm	25 mm	30 mm	20 mm	25 mm	30 mm
Fx	0.071	0.185	0.349	0.183	0.250	0.304	0.714	1.750	3.175
Fy	0.071	0.185	0.349	0.183	0.250	0.304	0.714	1.750	3.175
Fz	0.394	0.436	0.464	0.195	0.206	0.210	3.026	3.252	3.317
Mx	29.769	31.080	32.503	10.638	10.658	10.740	167.307	169.892	170.220
My	29.769	31.080	32.503	10.638	10.658	10.740	167.307	169.892	170.220
Mz	12.119	13.376	14.094	5.832	6.044	6.162	84.799	90.524	93.814

โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อขนาดความยาวของครีปเปลี่ยนไป

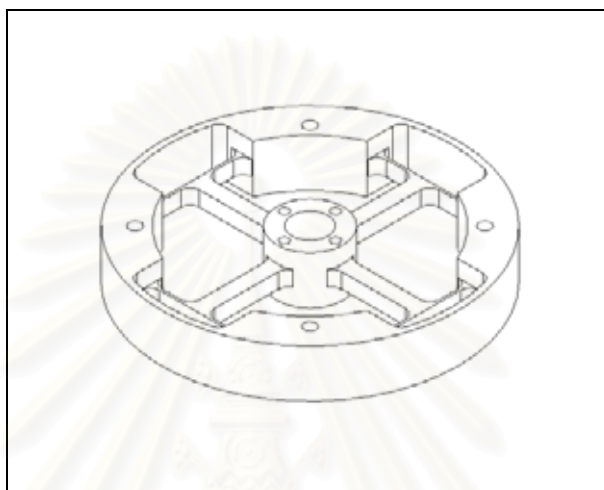
ความยาวครีป ชนิดโหนดที่ใส่	ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด (%)	
	20 mm	25 mm	30 mm	จาก 30 mm ไปเป็น 25	จาก 25 mm ไปเป็น 20
Fx	0.714	1.750	3.175	-44.886%	-59.204%
Fy	0.714	1.750	3.175	-44.886%	-59.204%
Fz	3.026	3.252	3.317	-1.960%	-6.938%
Mx	167.307	169.892	170.220	-0.193%	-1.522%
My	167.307	169.892	170.220	-0.193%	-1.522%
Mz	84.799	90.524	93.814	-3.507%	-6.324%

จากตารางที่ 5.10 และ 5.11 จะเห็นว่าการเปลี่ยนขนาดความยาวของครีปจะทำให้ความเครียดเปลี่ยนไปมากเมื่อชนิดโหนดเป็น Fx และ Fy โดยถ้าความยาวของครีปเพิ่มขึ้นจะทำให้สามารถวัดความเครียดอันเกิดจากโหนดชนิด Fx และ Fy เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับโหนดชนิดที่เหลือ ดังนั้นจะเลือกให้ขนาดความหนาของครีปเป็น 30 มม.

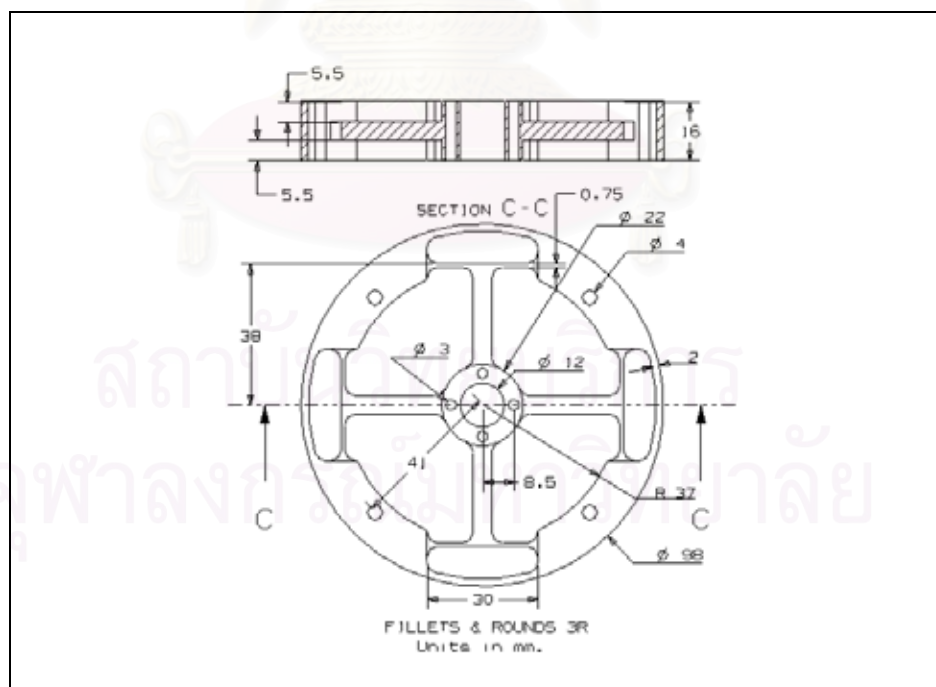
จากการวิเคราะห์ทั้งหมดจะเห็นได้ว่าส่วนที่มีผลที่จะทำให้โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงสามารถวัดแรง Fx และ Fy ได้ดีขึ้นก็คือ บริเวณครีปนั่นเอง ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงขนาดของครีปโดยการลดความหนาและเพิ่มความยาวครีป ทำให้โครงสร้างเกิดความเครียด

เพิ่มขึ้นเมื่อใส่แรง F_x และ F_y เท่าเดิม ซึ่งก็หมายถึง โครงสร้างจะมีความไวในการวัดแรง F_x และ F_y เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ดังนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบใหม่นี้จะมีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับโดยจะขอให้ชื่อว่า โครงสร้างแบบ A



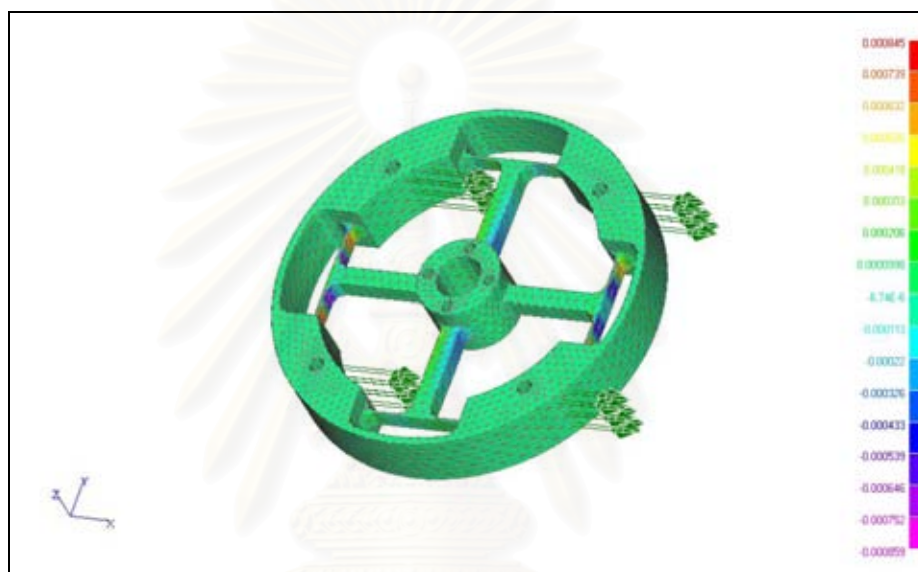
รูปที่ 5.17 ลักษณะโครงสร้างแบบ A



รูปที่ 5.18 ขนาดของโครงสร้างแบบ A

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบ A

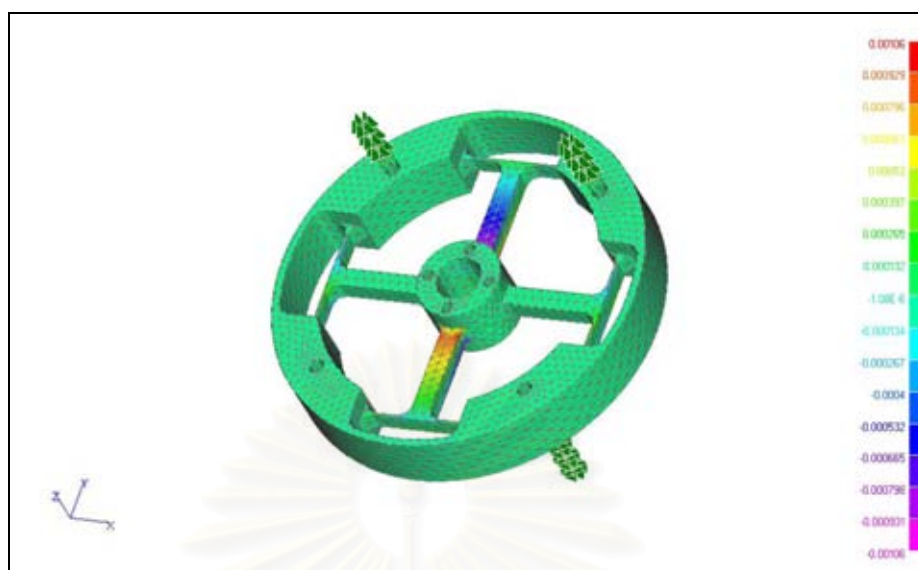
ในการวิเคราะห์นี้จะใช้เอลิเมนต์แบบเตตระฮีดรอน (tetrahedron) เช่นกัน เงื่อนไขขอบเขตและการใส่โหลดต่าง ๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับกับโครงสร้างแบบ Sensor II วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและไม่เป็นสนิม วิเคราะห์โดยใช้จำนวนจุดต่อ 29411 จุดต่อประกอบกันเป็น 15179 เอลิเมนต์ สำหรับผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 5.19 -5.26 และตารางที่ 5.12



รูปที่ 5.19 แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรง F_x



รูปที่ 5.20 แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรง F_z



รูปที่ 5.21 แสดงความเคียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่โมเมนต์ M_x



รูปที่ 5.22 แสดงความเคียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่โมเมนต์ M_z

จากรูปที่ 5.19 จะเห็นว่าเมื่อใส่แรง F_x จะทำให้เกิดความเคียดมากที่สุดบริเวณครึ่งบาง ๆ ทั้ง 2 ข้างซึ่งเป็นจุดที่เปราะบางที่สุด และเกิดความเคียดมากอีกจุดบนแกนที่ทอดตัวตามแนว y ใกล้กับจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง ส่วนความเคียดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรง F_y จะมีลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อใส่แรง F_x เพราะรูปมีลักษณะสมมาตรกันแนวแกน x และ y

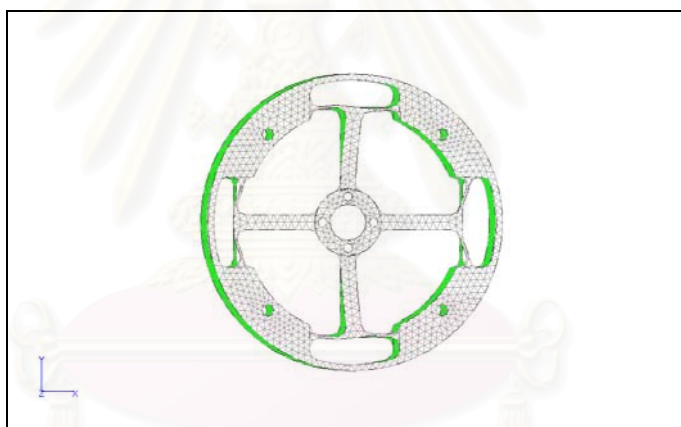
จากรูปที่ 5.20 จะเห็นว่าเมื่อใส่แรง F_z จะทำให้เกิดความเคียดมากที่สุดบนแกนทั้ง 4 บริเวณใกล้กับจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง

จากรูปที่ 5.21 จะเห็นว่าเมื่อใส่โมเมนต์ M_x จะทำให้เกิดความเครียดมากที่สุดบนแกนที่ทอดตัวตามแนว y ใกล้กับจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง สำหรับ M_y ก็จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ M_x เนื่องจากรูปมีลักษณะสมมาตรในแนวแกน x และ y

จากรูปที่ 5.22 จะเห็นว่าเมื่อใส่โมเมนต์ M_z จะทำให้เกิดความเครียดมากที่สุดบนแกนทั้ง 4 บริเวณใกล้กับจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง

จากรูปที่ 5.19-5.22 จะเห็นว่าเมื่อใส่โหลดแต่ละชนิดลงบนโครงสร้าง จะทำให้เกิดความเครียดมากที่สุดบนแกนทั้ง 4 บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง ดังนั้นจึงควรจะต้องตรวจเช็คเพื่อวัดความเครียดบริเวณนี้

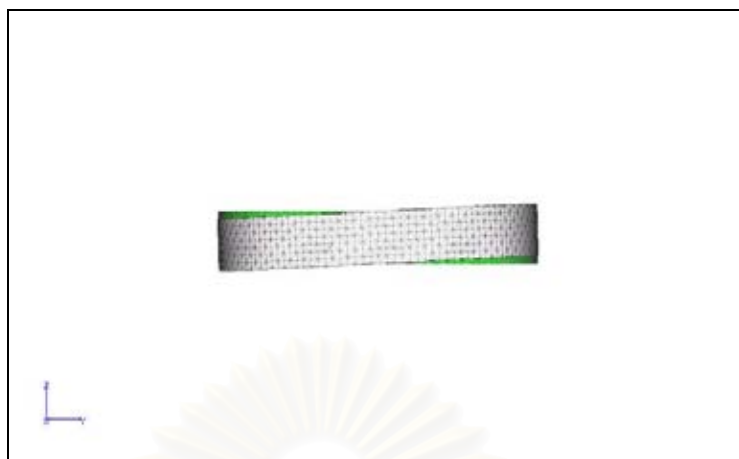
สำหรับรูปที่ 5.23 – 5.26 นั้นจะเป็นการแสดงลักษณะการเสียรูปเมื่อใส่โหลดลักษณะต่าง ๆ ของโครงสร้างแบบ A



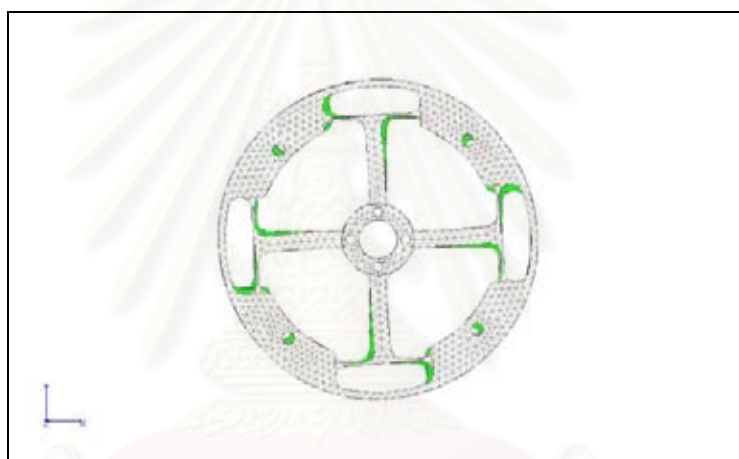
รูปที่ 5.23 แสดงการเสียรูปเมื่อใส่แรง F_x



รูปที่ 5.24 แสดงการเสียรูปเมื่อใส่แรง F_z



รูปที่ 5.25 แสดงการเสถียรรูปเมื่อใส่โมเมนต์ M_x



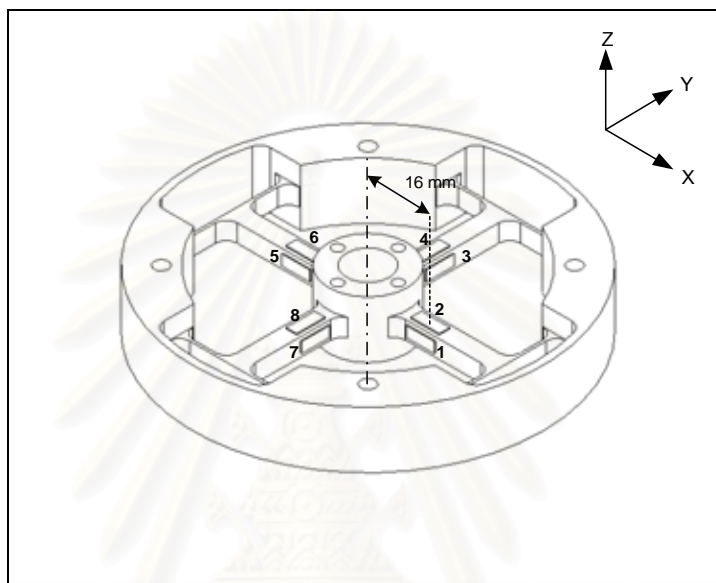
รูปที่ 5.26 แสดงการเสถียรรูปเมื่อใส่โมเมนต์ M_z

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบ A ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โครงสร้าง A ชนิดโหลด	ที่ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)	ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)	ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)
Fx	3,7	0.398	0.327	3.109
Fy	1,5	0.398	0.327	3.109
Fz	2,4,6,8	0.576	0.226	3.673
Mx	4,8	35.586	10.938	178.105
My	2,6	35.586	10.938	178.105
Mz	1,3,5,7	16.425	6.395	98.739

โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

จากตารางที่ 5.12 ในช่อง “ที่ตำแหน่ง” จะแสดงถึง ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าความเครียดหลักที่เกิดจากโหลดแต่ละชนิด ซึ่งจะต้องดูประกอบกับรูปที่ 5.27 โดยเราจะทำการติดสเตรนเกจห่างจากจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นระยะ 16 มม. (ซึ่งได้มาจากจากการดูบนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าบริเวณใดจะเกิดความเครียดมาก เมื่อมีโหลดชนิดต่างๆ มากระทำตามรูปที่ 5.19 - 5.22 นั้นเอง)



รูปที่ 5.27 บริเวณที่ติดสเตรนเกจบนโครงสร้างแบบ A

จากตารางที่ 5.12 จะได้เมตริกซ์ C_s ของโครงสร้างแบบ A ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & -3.109 & 0 & 0 & 0 & -98.739 \\ 0 & 0 & 3.673 & 0 & -178.105 & 0 \\ 3.109 & 0 & 0 & 0 & 0 & -98.739 \\ 0 & 0 & 3.673 & 178.105 & 0 & 0 \\ 0 & 3.109 & 0 & 0 & 0 & -98.739 \\ 0 & 0 & 3.673 & 0 & 178.105 & 0 \\ -3.109 & 0 & 0 & 0 & 0 & -98.739 \\ 0 & 0 & 3.673 & -178.105 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalization) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.8) จะได้เมตริกซ์ \bar{C}_s ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & -3.109 & 0 & 0 & 0 & -2.419 \\ 0 & 0 & 3.673 & 0 & -4.363 & 0 \\ 3.109 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.419 \\ 0 & 0 & 3.673 & 4.363 & 0 & 0 \\ 0 & 3.109 & 0 & 0 & 0 & -2.419 \\ 0 & 0 & 3.673 & 0 & 4.363 & 0 \\ -3.109 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.419 \\ 0 & 0 & 3.673 & -4.363 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

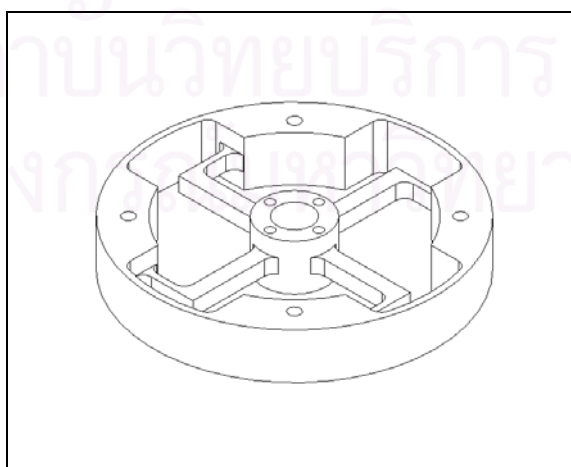
จากเมตริกซ์ \bar{C}_s ทำการหาค่าเชิงคุณลาร์วออยู่ได้ดังนี้

$$\sigma_1 = 7.3460 \quad \sigma_2 = 6.1704 \quad \sigma_3 = 6.1704 \quad \sigma_4 = 4.8377 \quad \sigma_5 = 4.3968 \quad \sigma_6 = 4.3968$$

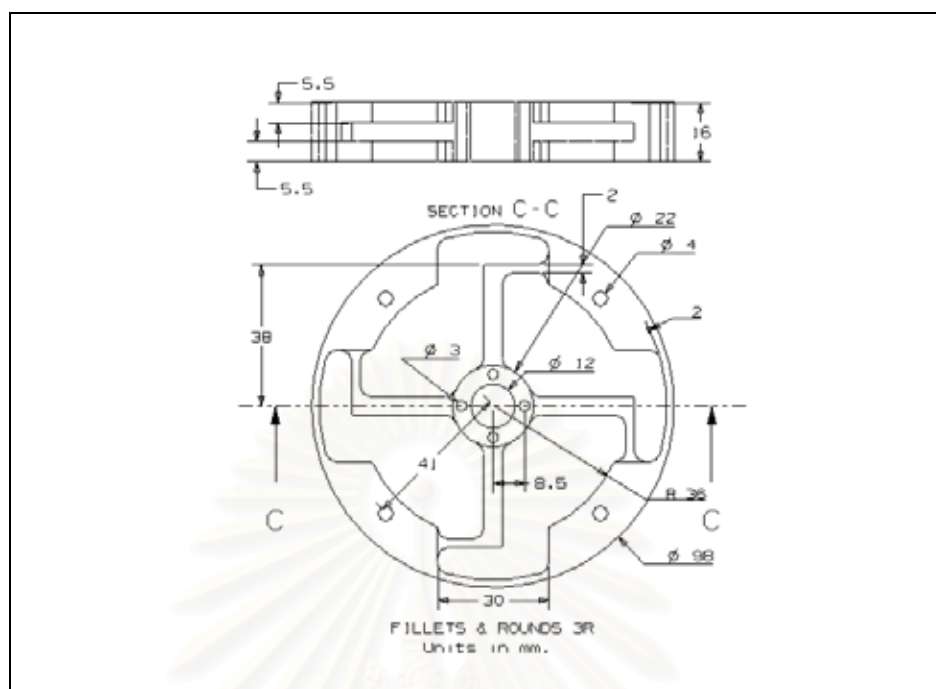
ดังนั้นจะหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของโครงสร้างแบบ A ได้เท่ากับ $7.3460/4.3968 = 1.6708$ และค่าความถี่ธรรมชาติตัวแรก (1^{st} natural frequency) หาได้เท่ากับ 623.75 Hz

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบ B

ลองคิดโครงสร้างขึ้นใหม่อีกแบบซึ่งปรับเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบ A โดยปรับเปลี่ยนเฉพาะบริเวณครีปซึ่งเป็นบริเวณที่มีผลต่อความเครียดมากที่สุด มีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 ขอเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า โครงสร้างแบบ B ซึ่งจะวิเคราะห์โดยใช้เอลิเมนต์แบบเตตระฮีดรอน (tetrahedron) จำนวนจุดต่อ 28929 จุดต่อประกอบกันเป็น 15001 เอลิเมนต์ ลักษณะเงื่อนไขขอบเขตและการใส่โหลดต่าง ๆ เหมือนกับ Sensor II วัสดุที่ใช้สร้างก็เป็นอลูมิเนียมเช่นเดียวกัน สำหรับผลการวิเคราะห์จะแสดงในตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.28 ลักษณะโครงสร้างแบบ B



รูปที่ 5.29 ขนาดโครงสร้างแบบ B

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบ B ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โครงสร้างB ชนิดโหลด	ที่ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)	ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)	ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)
Fx	3,7	0.389	0.184	2.585
Fy	1,5	0.389	0.184	2.585
Fz	2,4,6,8	0.603	0.213	3.194
Mx	4,8	41.971	11.419	174.832
My	2,6	41.971	11.419	174.832
Mz	1,3,5,7	15.448	6.261	94.252

โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress

ในตารางที่ 5.13 ช่อง “ที่ตำแหน่ง” จะแสดงถึง ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าความเครียดหลักที่เกิดจากโหลดแต่ละชนิด โดยจะต้องดูประกอบกับรูปที่ 5.27 ซึ่งโครงสร้างแบบ A และ B จะเลือกตำแหน่งติดสเตรนเกจที่เดียวกัน

จากตารางที่ 5.13 จะได้เมตริกซ์ C_s ของโครงสร้างแบบ B ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & -2.585 & 0 & 0 & 0 & -94.252 \\ 0 & 0 & 3.194 & 0 & -174.832 & 0 \\ 2.585 & 0 & 0 & 0 & 0 & -94.252 \\ 0 & 0 & 3.194 & 174.832 & 0 & 0 \\ 0 & 2.585 & 0 & 0 & 0 & -94.252 \\ 0 & 0 & 3.194 & 0 & 174.832 & 0 \\ -2.585 & 0 & 0 & 0 & 0 & -94.252 \\ 0 & 0 & 3.194 & -174.832 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalization) ตามสมการที่ 3.6 และ 3.8 จะได้เมตริกซ์ \bar{C}_s ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & -2.585 & 0 & 0 & 0 & -2.024 \\ 0 & 0 & 3.194 & 0 & -3.755 & 0 \\ 2.585 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.024 \\ 0 & 0 & 3.194 & 3.755 & 0 & 0 \\ 0 & 2.585 & 0 & 0 & 0 & -2.024 \\ 0 & 0 & 3.194 & 0 & 3.755 & 0 \\ -2.585 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.024 \\ 0 & 0 & 3.194 & -3.755 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ \bar{C}_s ทำการหาค่าเชิงคุณลักษณะได้ดังนี้

$$\sigma_1 = 6.3880 \quad \sigma_2 = 5.3101 \quad \sigma_3 = 5.3101 \quad \sigma_4 = 4.0484 \quad \sigma_5 = 3.6557 \quad \sigma_6 = 3.6557$$

ดังนั้นจะหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของโครงสร้างแบบ B ได้เท่ากับ $6.3880/3.6557 = 1.7474$ และค่าความถี่ธรรมชาติตัวแรก (1^{st} natural frequency) หาได้เท่ากับ 566.06 Hz

ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง A กับ โครงสร้าง B และ Sensor II

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาสามารถนำมาเปรียบเทียบเป็นตารางเพื่อให้เห็นชัดเจนได้ดังตารางที่ 5.14 – 5.17

ตารางที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างโครงสร้าง Sensor II, แบบ A และ แบบ B

ชนิดโครงสร้าง ชนิดโหลดที่ใส่	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด			ความเค้นมากที่สุด			ความเครียด		
	(Micron/NหรือMicron/N.m)			(Mpa/NหรือMpa/N.m)			(μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)		
	SensorII	แบบ A	แบบ B	SensorII	แบบ A	แบบ B	SensorII	แบบ A	แบบ B
Fx	0.094	0.398	0.389	0.067	0.327	0.184	1.313	3.109	2.585
Fy	0.094	0.398	0.389	0.067	0.327	0.184	1.313	3.109	2.585
Fz	0.275	0.576	0.603	0.132	0.226	0.213	2.095	3.673	3.194
Mx	30.168	35.586	41.971	10.556	10.938	11.419	174.743	178.105	174.832
My	30.168	35.586	41.971	10.556	10.938	11.419	174.743	178.105	174.832
Mz	17.301	16.425	15.448	6.649	6.395	6.261	56.475	98.739	94.252

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป

ชนิดโครงสร้าง ชนิดโหลดที่ใส่	ความเครียด (μ strain/Nหรือ μ strain/N.m)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเครียด (%)	
	SensorII	แบบ A	แบบ B	SensorII ไปเป็นแบบ A	SensorII ไปเป็นแบบ B
Fx	1.313	3.109	2.585	136.786%	96.877%
Fy	1.313	3.109	2.585	136.786%	96.877%
Fz	2.095	3.673	3.194	75.322%	52.458%
Mx	174.743	178.105	174.832	1.924%	0.051%
My	174.743	178.105	174.832	1.924%	0.051%
Mz	56.475	98.739	94.252	74.837%	66.892%

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเค้นมากที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป

ชนิดโครงสร้าง ชนิดโหลดที่ใส่	ความเค้นมากที่สุด (Mpa/NหรือMpa/N.m)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความเค้นมากที่สุด (%)	
	SensorII	แบบ A	แบบ B	SensorII ไปเป็นแบบ A	SensorII ไปเป็นแบบ B
Fx	0.067	0.327	0.184	388.060%	174.627%
Fy	0.067	0.327	0.184	388.060%	174.627%
Fz	0.132	0.226	0.213	71.212%	61.364%
Mx	10.556	10.938	11.419	3.619%	8.175%
My	10.556	10.938	11.419	3.619%	8.175%
Mz	6.649	6.395	6.261	-3.820%	-5.835%

โดยที่ความเค้นมากที่สุดนี้คือ Von Mises stress

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างไป

ชนิดโครงสร้าง	ระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (Micron/NหรือMicron/N.m)			เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของระยะเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (%)	
	SensorII	แบบ A	แบบ B	SensorII ไปเป็นแบบ A	SensorII ไปเป็นแบบ B
Fx	0.094	0.398	0.389	323.404%	313.830%
Fy	0.094	0.398	0.389	323.404%	313.830%
Fz	0.275	0.576	0.603	109.455%	119.273%
Mx	30.168	35.586	41.971	17.959%	39.124%
My	30.168	35.586	41.971	17.959%	39.124%
Mz	17.301	16.425	15.448	-5.063%	-10.710%

จากตารางที่ 5.15 จะเห็นว่าเมื่อใช้โครงสร้างแบบ A เมื่อโหลดที่ใช้เป็น Fx และ Fy จะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้น 136.786 % ในขณะที่โครงสร้างแบบ B จะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้น 96.877 % จะเห็นว่าโครงสร้างทั้ง 2 แบบจะสามารถวัดแรง Fx และ Fy ได้ดีกว่า Sensor II มาก นอกจากนี้ก็ยังสามารถวัดแรง Fz และ Mz ได้ดีขึ้นกว่าเดิมอีกด้วย โดยจะเห็นว่าโครงสร้างแบบ A จะดีกว่าโครงสร้างแบบ B เล็กน้อยทุก ๆ ชนิดของโหลด

จากตารางที่ 5.16 จะเห็นว่าเมื่อใช้โครงสร้างแบบ A และ B จะมีผลทำให้เกิดความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อชนิดของโหลดเป็น Fx หรือ Fy โดยจะเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณครีบบาง ๆ ซึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความเค้นที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้โครงสร้างแบบ A และ B เกิดความเสียหายหรือไม่ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทำโครงสร้างคือ อลูมิเนียม ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงคราก (yield strength) ประมาณ 160 Mpa ในที่นี้จะใช้ตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 3 ดังนั้นความเค้นมากที่สุดของโครงสร้างไม่ควรเกิน $160/3 = 53.33$ Mpa

ในกรณีที่โหลดเป็นแรง Fx หรือ Fy แรงมากที่สุดที่โครงสร้างจะรับควรมีค่าไม่เกิน $53.33/0.327 = 163.09$ นิวตัน สำหรับโครงสร้าง A และมีค่าไม่ควรเกิน $53.33/0.184 = 289.84$ นิวตัน สำหรับโครงสร้าง B

ในกรณีที่โหลดเป็น Fz แรงมากที่สุดที่โครงสร้างจะรับในแนวแกน z ควรมีค่าไม่เกิน $53.33/0.226 = 235.97$ สำหรับโครงสร้าง A และมีค่าไม่ควรเกิน $53.33/0.213 = 250.38$ นิวตัน สำหรับโครงสร้าง B

ในกรณีที่โหลดเป็น M_x หรือ M_y ค่าโมเมนต์มากที่สุดที่โครงสร้างจะรับไม่ควรเกิน $53.33/10.938 = 4.88$ นิวตันเมตร สำหรับโครงสร้าง A และมีค่าไม่ควรเกิน $53.33/11.419 = 4.67$ นิวตันเมตร สำหรับโครงสร้าง B

ในกรณีที่โหลดเป็น M_z ค่าโมเมนต์มากที่สุดที่โครงสร้างจะรับไม่ควรเกิน $53.33/6.395 = 8.34$ นิวตันเมตร สำหรับโครงสร้าง A และมีค่าไม่ควรเกิน $53.33/6.261 = 8.52$ นิวตันเมตร สำหรับโครงสร้าง B

จากตารางที่ 5.17 จะเห็นว่าเมื่อใช้โครงสร้างแบบ A และ B จะมีผลทำให้เกิดระยะที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อชนิดของโหลดเป็น F_x หรือ F_y ดังนั้นถ้ากำหนดให้ระยะที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุดไม่ควรเกิน 25 ไมครอนดังที่ได้เสนอในบทที่ 3

ค่า F_x หรือ F_y มากที่สุดที่จะทำให้โครงสร้างเสียรูปไปไม่เกิน 25 ไมครอนก็จะมีค่า $25/0.398 = 62.81$ นิวตัน สำหรับโครงสร้างแบบ A และมีค่า $25/0.389 = 64.27$ นิวตัน สำหรับโครงสร้างแบบ B

ค่าแรง F_z ที่มากที่สุดที่จะทำให้โครงสร้างเสียรูปไม่เกิน 25 ไมครอนสำหรับโครงสร้าง A จะมีค่า $25/0.576 = 43.40$ นิวตัน ส่วนโครงสร้าง B จะมีค่า $25/0.603 = 41.46$ นิวตัน

ต่อมาจะพิจารณาในส่วนของโมเมนต์ M_x หรือ M_y ว่าค่า M_x หรือ M_y มากที่สุดที่ทำให้โครงสร้างบิดตัวไม่เกิน 0.002 องศาตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 มีค่าเท่าใด โดยลักษณะของการเสียรูปของโครงสร้างอันเนื่องมาจาก M_x และ M_y จะเป็นไปตามรูปที่ 5.25 ซึ่งจะเห็นว่าจุดที่จะเสียรูปไปมากที่สุดก็คือ บริเวณขอบนอกสุดของโครงสร้าง ดังนั้นหากรู้ขนาดรัศมีของโครงสร้าง และรู้ระยะที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุด ก็จะสามารถประมาณว่าโครงสร้างบิดไปมากที่สุดเท่าไร ในที่นี้รัศมีของโครงสร้าง A และ B มีขนาดเท่ากันคือ 49 มม. ส่วนระยะเคลื่อนที่มากที่สุดเรารู้จากตารางที่ 5.17 ดังนั้นจะได้ว่าโครงสร้าง A บิดไปมากที่สุดประมาณ $35.586 * 10^{-6} / 0.049 = 7.26 * 10^{-4}$ องศา/นิวตันเมตร ส่วนโครงสร้าง B จะบิดไปมากที่สุดประมาณ $41.971 * 10^{-6} / 0.049 = 8.57 * 10^{-4}$ องศา/นิวตันเมตร ทำนองจะสามารถหาโมเมนต์ M_x หรือ M_y มากที่สุดที่ทำให้โครงสร้างบิดตัวไม่เกิน 0.002 องศาสำหรับโครงสร้าง A ได้ $0.002 / (7.26 * 10^{-4}) = 2.75$ นิวตันเมตร ส่วนโครงสร้าง B จะมีค่า $0.002 / (8.57 * 10^{-4}) = 2.33$ นิวตันเมตร

ต่อมาจะพิจารณาในส่วนของโมเมนต์ M_z ว่าค่า M_z มากที่สุดที่ทำให้โครงสร้างบิดตัวไม่เกิน 0.002 องศา มีค่าเท่าใด โดยลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างอันเนื่องมาจาก M_z ก็จะเป็น

ดังรูปที่ 5.26 ซึ่งก็จะเห็นว่าระยะที่เสียรูปไปมากที่สุดก็คือ ขอบนอกสุดของโครงสร้าง เช่นเดียวกันกับกรณี M_x ดังนั้นสำหรับกรณีที่โหลดเป็น M_z จะได้ว่าโครงสร้าง A จะบิดไปมากที่สุดประมาณ $16.425 \times 10^{-6}/0.049 = 3.35 \times 10^{-4}$ องศา/นิวตันเมตร ส่วนโครงสร้าง B จะบิดไปมากที่สุดประมาณ $15.448 \times 10^{-6}/0.049 = 3.15 \times 10^{-4}$ องศา/นิวตันเมตร ทำยที่สุดจะสามารถหาโมเมนต์ M_z มากสุดที่ทำให้โครงสร้างบิดตัวไม่เกิน 0.002 องศาสำหรับโครงสร้าง A ได้ $0.002/(3.35 \times 10^{-4}) = 5.97$ นิวตันเมตร ส่วนโครงสร้าง B จะมีค่า $0.002/(3.15 \times 10^{-4}) = 6.35$ นิวตันเมตร

จะเห็นว่าจากตารางที่ 5.17 จะสามารถคำนวณหาแรงและโมเมนต์มากที่สุดที่โครงสร้าง A และ B สามารถวัดได้แล้วทำให้โครงสร้างเสียรูปไม่เกิน 25 ไมครอนหรือบิดไปไม่เกิน 0.002 องศา โดยประมาณดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 แสดงแรงและโมเมนต์มากที่สุดที่โครงสร้าง A และ B สามารถวัดได้โดยโครงสร้างเสียรูปไม่เกิน 25 ไมครอนหรือบิดไปไม่เกิน 0.002 องศา

ชนิดโหลด	แรงและโมเมนต์มากที่สุดที่วัดได้	
	โครงสร้าง A	โครงสร้าง B
F_x	62.81 N	64.27 N
F_y	62.81 N	64.27 N
F_z	43.40 N	41.46 N
M_x	2.75 N.m	2.33 N.m
M_y	2.75 N.m	2.33 N.m
M_z	5.97 N.m	6.35 N.m

สำหรับค่าคอนดิชันนัมเบอร์จะเห็นว่าโครงสร้าง A คำนวณได้เท่ากับ 1.6708 ซึ่งดีกว่าโครงสร้าง B และ Sensor II ซึ่งคำนวณค่าคอนดิชันนัมเบอร์ได้ 1.7474 และ 2.5168 ตามลำดับ

สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติตัวแรกนั้นโครงสร้าง A มีค่า 623.75 Hz ส่วนโครงสร้าง B มีค่า 566.06 Hz จะเห็นว่าทั้งโครงสร้างทั้งสองแบบมีค่าความถี่ธรรมชาติตัวแรกมากกว่าความถี่ปกติที่หุ่นยนต์ทำงานมาก (มากกว่า 10 เท่า) ซึ่งจะเป็นการป้องกันปัญหาเรื่องเรโซแนนซ์ (resonance) ที่จะเกิดขึ้นแล้วทำให้โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเสียหาย

สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง A กับ โครงสร้าง B และ Sensor II

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทั้งหมดจะเห็นว่าทั้งโครงสร้าง A และ B จะมีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าโครงสร้าง Sensor II และโครงสร้าง A จะมีประสิทธิภาพดีกว่าโครงสร้าง B เล็กน้อย ดังนั้นจะขอใช้โครงสร้าง A เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวใหม่ที่จะพัฒนาขึ้น ให้ชื่อโครงสร้าง A ใหม่กว่า Sensor III และทำการสร้างจริงและทดลองต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดลอง

ในส่วนของ การทดลองนั้นจะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกจะเป็นการปรับเทียบค่า (calibration) อุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่าของสเตรนคอมไพลแอนซ์เมตริกซ์ (C_s) แล้วนำไปคำนวณหาเซนเซอร์คาลิเบชันเมตริกซ์ (C_s^+) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงและโมเมนต์ สำหรับส่วนที่ 2 นั้นจะเป็นการทดลองหาค่าคุณสมบัติทางด้านสแตติกของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงหลังจากที่ได้ทำการปรับเทียบค่าเรียบร้อยแล้ว ส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนของ การทดลองวัดแรงและโมเมนต์ในทุกทิศทางพร้อม ๆ กัน

6.1 การปรับเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรง

การปรับเทียบค่าโดยทั่วไปหมายถึง การกำหนดให้ทุก ๆ อินพุทมีค่าคงที่เว้นแต่ อินพุทหนึ่งที่เราสนใจ โดยจะทำการเปลี่ยนค่าอินพุทตัวนี้ไปหลาย ๆ ค่า ซึ่งก็จะมีผลทำให้เกิดเอาท์พุทมีค่าเปลี่ยนแปลงไปหลายค่าด้วย ซึ่งเราจะบันทึกค่าเอาท์พุทที่ได้นี้ไว้ โดยเอาท์พุทนี้อาจจะมีหลาย ๆ ตัวก็ได้ โดยขั้นตอนเหล่านี้จะกระทำซ้ำกันจนกระทั่งครบทุกอินพุทที่มี เราก็จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทครบทั้งหมด

การปรับเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้อินพุททั้งหมดก็มีด้วยกัน 6 ค่าคือ F_x F_y F_z M_x M_y และ M_z ส่วนค่าเอาท์พุทก็คือ ค่าความเครียดที่วัดได้ ซึ่งจะมีด้วยกัน 8 ค่าตามชุดสเตรนเกจ 8 ชุดที่ติด ดังนั้นในการปรับเทียบค่าก็จะต้องทำทั้งหมด 6 ครั้งด้วยกันตามจำนวนอินพุทที่มี โดยครั้งแรกก็เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_x ที่รู้ค่าซึ่งเป็นอินพุทกับค่าความเครียดที่วัดได้ซึ่งเป็นเอาท์พุท โดยที่อินพุทตัวอื่นจะมีค่าคงที่ (ในที่นี้จะมีค่าเป็นศูนย์) โดยจะทำการเพิ่มและลดแรง F_x ไปหลาย ๆ ค่าแล้วทำการจดบันทึกค่าความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุดข้างต้น ต่อมาก็ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_y ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้ ทำเช่นนี้กับ F_z M_x M_y และ M_z จนครบก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ที่เรารู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้ครบทั้งหมด ซึ่งเราจะนำความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าสเตรนคอมไพลแอนซ์เมตริกซ์ (C_s) ต่อไป

จากบทที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้แสดงได้ดังสมการที่ (3.1) ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_s = C_s f_s$$

เขียนใหม่ตามความเครียดที่เรารู้ 8 ค่ากับแรงและโมเมนต์ทั้งหมด 6 ชนิดได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{s11} & C_{s12} & C_{s13} & C_{s14} & C_{s15} & C_{s16} \\ C_{s21} & C_{s22} & C_{s23} & C_{s24} & C_{s25} & C_{s26} \\ C_{s31} & C_{s32} & C_{s33} & C_{s34} & C_{s35} & C_{s36} \\ C_{s41} & C_{s42} & C_{s43} & C_{s44} & C_{s45} & C_{s46} \\ C_{s51} & C_{s52} & C_{s53} & C_{s54} & C_{s55} & C_{s56} \\ C_{s61} & C_{s62} & C_{s63} & C_{s64} & C_{s65} & C_{s66} \\ C_{s71} & C_{s72} & C_{s73} & C_{s74} & C_{s75} & C_{s76} \\ C_{s81} & C_{s82} & C_{s83} & C_{s84} & C_{s85} & C_{s86} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

จากสมการที่ (6.1) จะเห็นว่าถ้ากำหนดให้ F_x เป็นอินพุตที่มีค่าเพียงตัวเดียวโดยที่ F_y F_z M_x M_y และ M_z เป็นศูนย์ สมการจะลดรูปเหลือดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{s11} F_x \\ C_{s21} F_x \\ C_{s31} F_x \\ C_{s41} F_x \\ C_{s51} F_x \\ C_{s61} F_x \\ C_{s71} F_x \\ C_{s81} F_x \end{bmatrix}$$

เช่นเดียวกันถ้ากำหนดให้ F_y เป็นอินพุตที่มีค่าเพียงตัวเดียวโดยที่ F_x F_z M_x M_y และ M_z เป็นศูนย์ สมการที่ (6.1) ก็จะลดรูปเหลือดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{s12} F_y \\ C_{s22} F_y \\ C_{s32} F_y \\ C_{s42} F_y \\ C_{s52} F_y \\ C_{s62} F_y \\ C_{s72} F_y \\ C_{s82} F_y \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเราจะสามารถหา C_{s11} ได้ซึ่งมันก็คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจชุดที่ 1

C_{s21} ก็คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจชุดที่ 2

ในขณะที่ C_{s12} ก็คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจชุดที่ 1 เป็นต้น

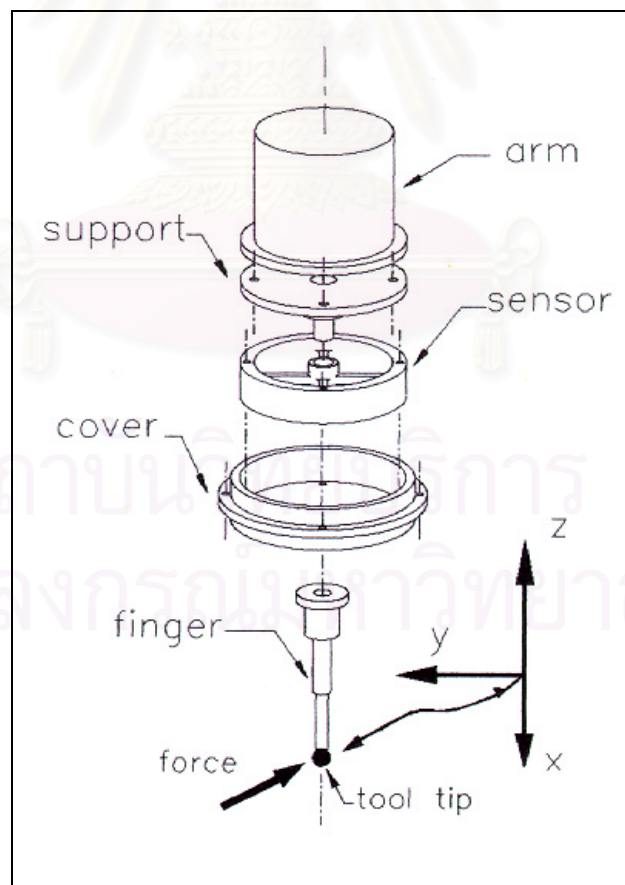
จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าสามารถหาค่าสเตรนคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์ (C_s) ได้ถ้าเรารู้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้ครบทั้งหมด ซึ่งจากสเตรนคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์ (C_s) ที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณค่าคอนดิชันนัมเบอร์เพื่อวิเคราะห์หิมล และนำไปคำนวณหาเซนเซอร์คาลิเบชันเมตริกซ์ (C_s^+) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่ใช้คำนวณหาแรงและโมเมนต์ได้ต่อไปดังสมการที่ (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบค่าประกอบด้วย

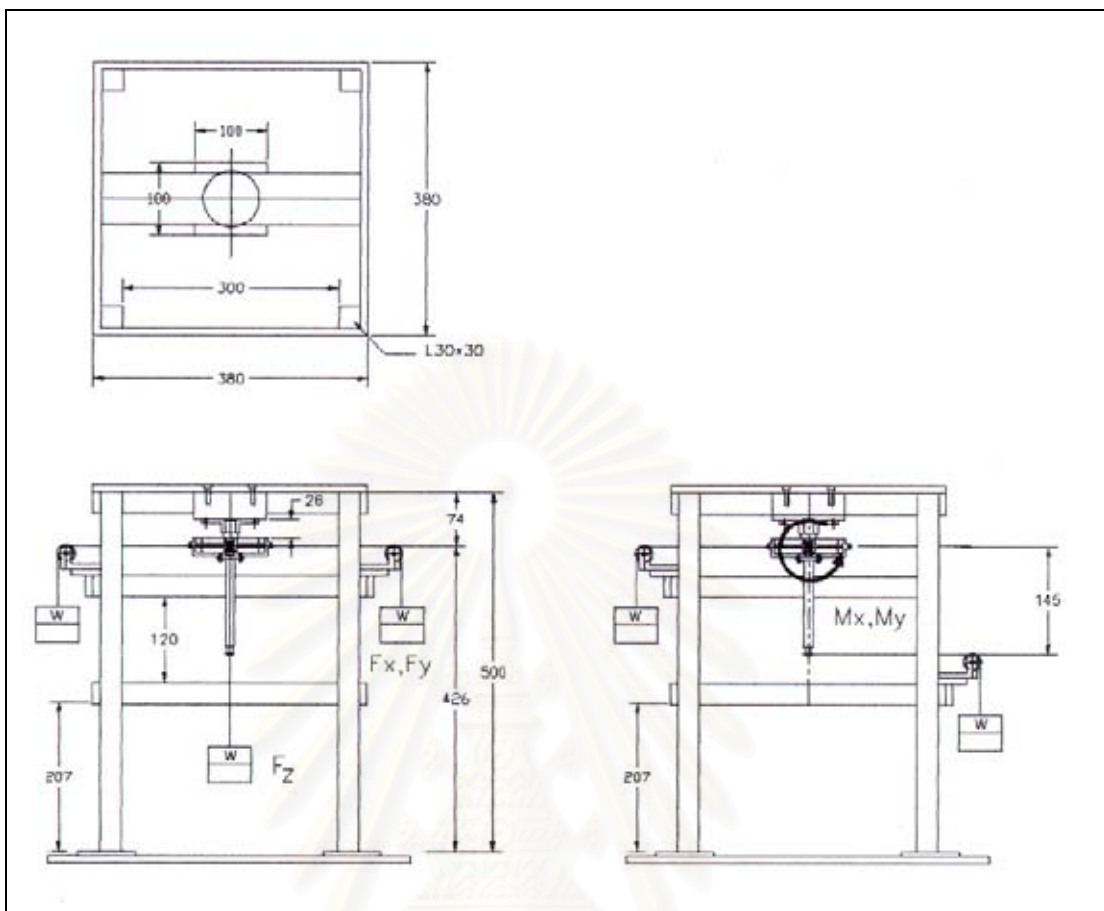
1. โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Sensor III ซึ่งทำจากอลูมิเนียมตามรูปที่ 5.18 และ 6.1 และชุดประกอบของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตามรูปที่ 6.2
2. สเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa รหัส KFG-3-120-C1-11L1M2R ความยาวเกจ 3 มิลลิเมตร ความต้านทาน 119.6 ± 0.4 โอห์ม เกจแพคเตอร์ 2.10 ± 1.0 % จำนวน 8 ตัว และ สเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa รหัส KFG-5-120-C1-23L1M2R ความยาวเกจ 5 มิลลิเมตร ความต้านทาน 120.4 ± 0.4 โอห์ม เกจแพคเตอร์ 2.15 ± 1.0 % จำนวน 8 ตัว
3. ชุดโต๊ะทดลองที่ใช้ในการปรับเทียบค่าดังรูปที่ 6.3
4. ชุดมวลมาตรฐานขนาด 0.5 ปอนด์และขนาด 1 ปอนด์
5. ดิจิตอลสเตรนบริจ (digital strain bridge) รุ่น E10 Mk II สำหรับวัดค่าความเครียดตามรูปที่ 6.4 ซึ่งมีความละเอียด (resolution) เท่ากับ 1 ไมโครสเตรน



รูปที่ 6.1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ Sensor III ซึ่งทำจากอลูมิเนียม



รูปที่ 6.2 แสดงชุดประกอบของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

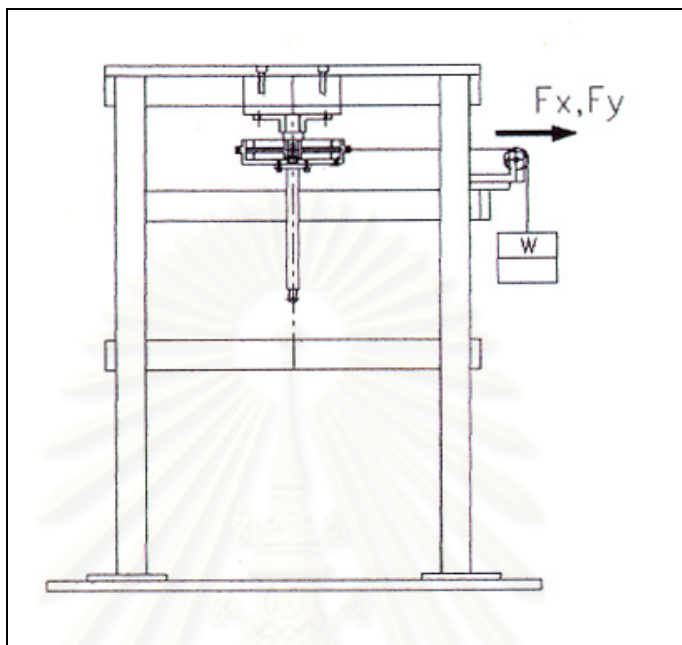


รูปที่ 6.3 ชุดโต๊ะทดลองที่ใช้ในการปรับเทียบค่า

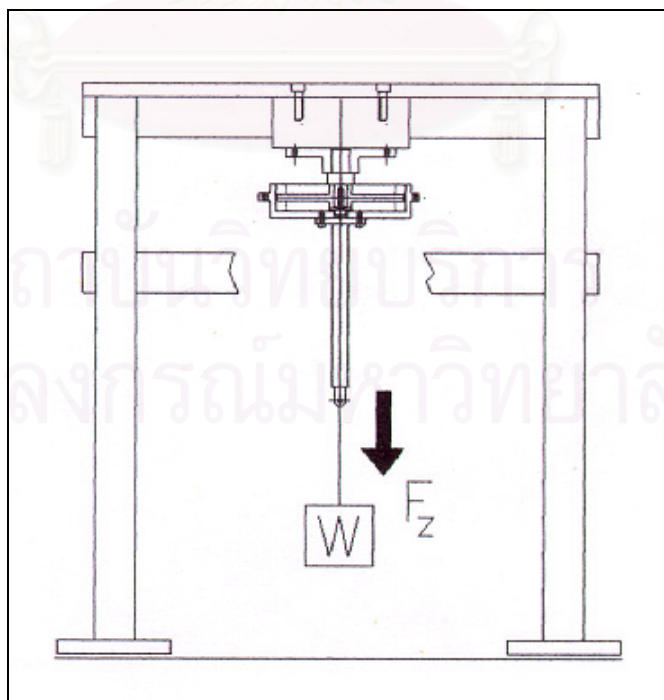


รูปที่ 6.4 ดิจิตอลสเตรนบริจสำหรับใช้วัดความเครียด

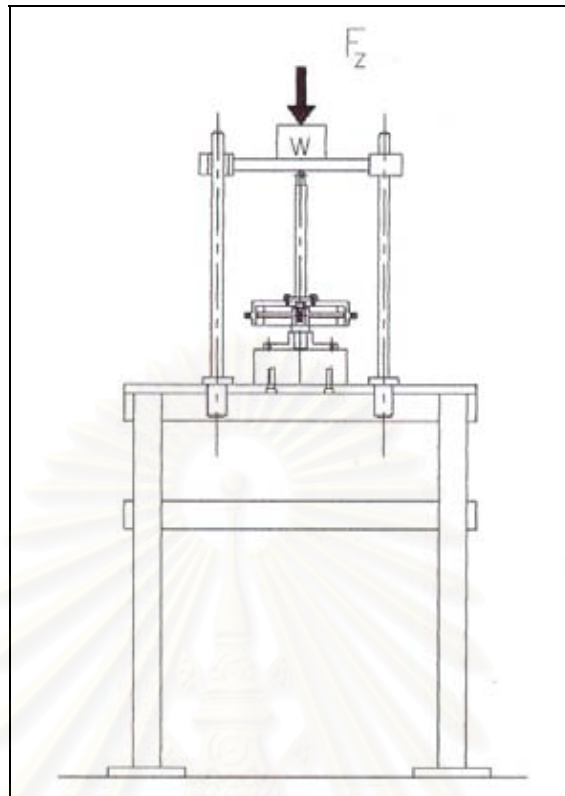
สำหรับลักษณะการใส่แรงและโมเมนต์ชนิดต่าง ๆ บนโต๊ะทดลองเพื่อใช้ในการปรับเทียบค่าจะแสดงในรูปที่ 6.5–6.9



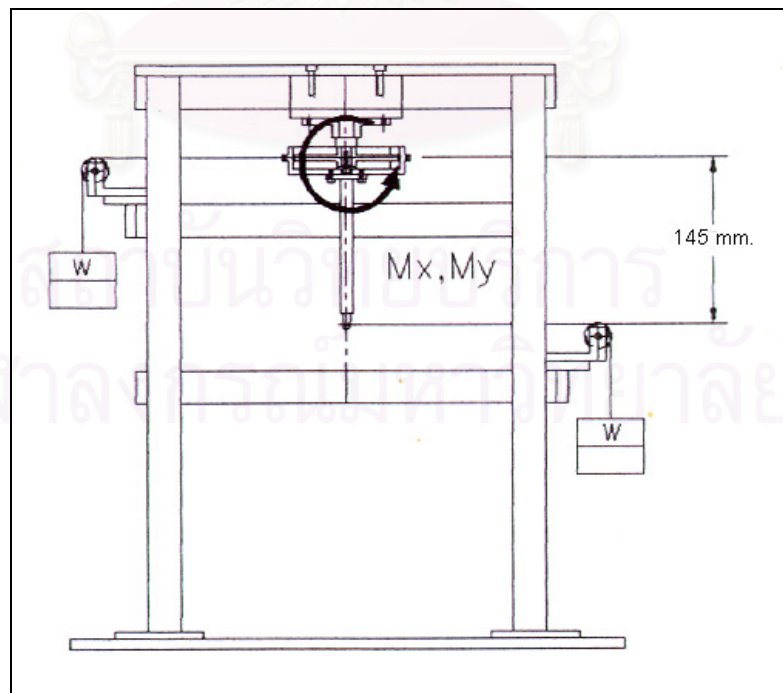
รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะการใส่แรง F_x และ F_y



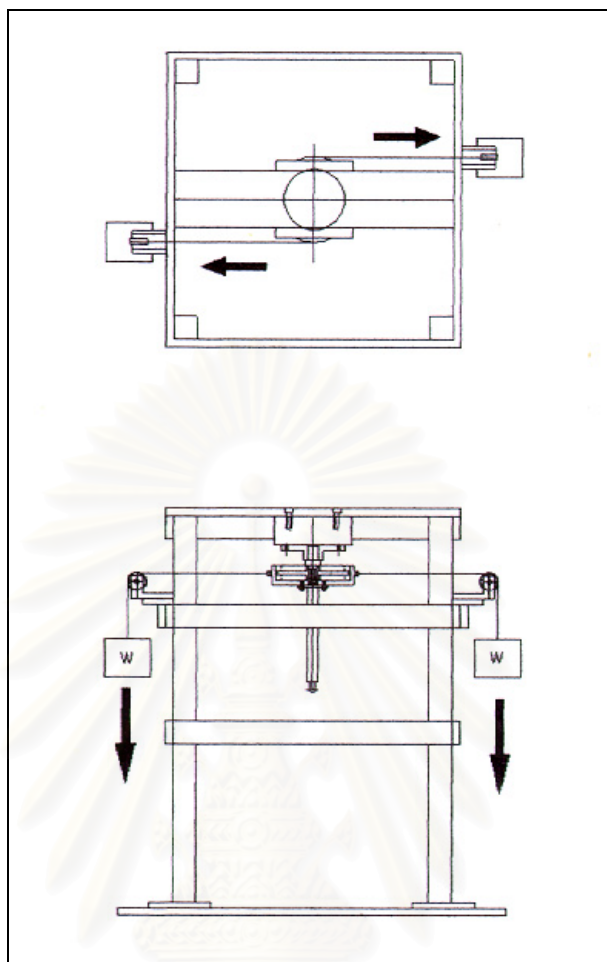
รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะการใส่แรง F_z ในแนวแกน Z ลง



รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะการใส่แรง F_z ในแนวแกน Z บวก



รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะการใส่โมเมนต์ M_x และ M_y



รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะการใส่โมเมนต์ Mz

จากรูปที่ 6.5-6.9 จะเห็นว่าทุกรูปจะเป็นการใส่แรงหรือโมเมนต์เพียงทิศทางเดียว โดยที่แรงหรือโมเมนต์ในทิศทางที่เหลือจะมีค่าเป็นศูนย์

6.2 การทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านสแตติกของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

หลังจากปรับเทียบค่าแล้วก็จะทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านสแตติกของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง ดังต่อไปนี้

1. ค่าความถูกต้อง (accuracy) เป็นค่าที่บอกถึงความแม่นยำในการวัด ซึ่งจะมีวิธีบอกเป็นค่าความผิดพลาดในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าที่วัดได้กับค่าจริง ซึ่งอาจบอกได้ 2 วิธีคือ ในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของค่าฟูลสเกล (percent of the full-scale reading) กับ เปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่าน (percent of the reading) ซึ่งมีวิธีหาดังสมการที่ (6.2) และ (6.3)

$$\text{➤ เปอร์เซ็นต์ของค่าฟูลสเกล} = \frac{\text{ค่าผิดพลาด}}{\text{ค่าฟูลสเกล}} * 100\% \quad (6.2)$$

$$\text{➤ เปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่าน} = \text{ค่าผิดพลาด/ค่าโหลดจริง} * 100\% \quad (6.3)$$

โดยที่ค่าผิดพลาด = ค่าโหลดที่วัดได้ - ค่าโหลดจริง และค่าพูลสเกลหมายถึง ค่าโหลดที่มากที่สุดที่เครื่องมือวัดสามารถวัดได้

2. ค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability) คือ ค่าที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดโดยการป้อนค่าอินพุตค่าเดิมหลาย ๆ ครั้ง แล้วทำการวัดเพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายของค่าเอาต์พุต ซึ่งหาได้ดังสมการที่ (6.4)

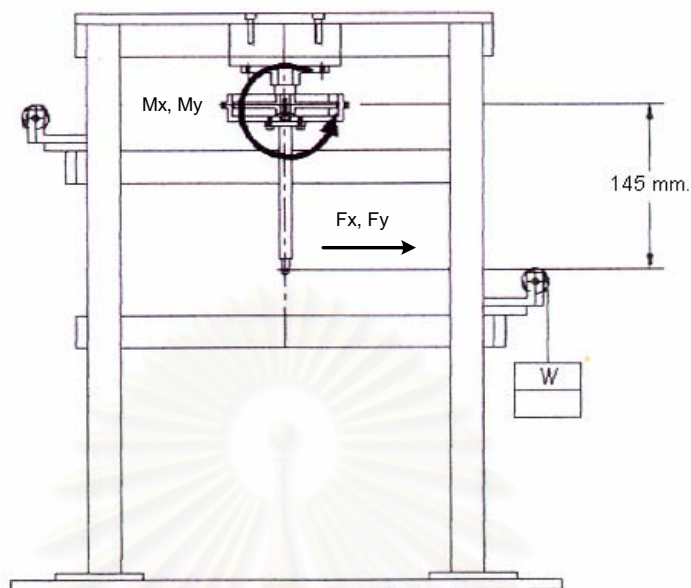
$$\text{➤ รีพีทอะบิลิตี้} = (\text{ค่าเอาต์พุตมากที่สุด} - \text{ค่าเอาต์พุตน้อยสุด}) / \text{ค่าพูลสเกล} * 100\% \quad (6.4)$$

3. ค่าความละเอียด (resolution) คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของอินพุตน้อยสุดที่ทำให้เอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในที่นี้ก็หมายถึง แรงหรือโมเมนต์ที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้สามารถวัดความเครียดได้นั่นเอง

4. ค่าความไว (sensitivity) คือ ค่าความชันของกราฟปรับเทียบค่า (calibration curve) ในที่นี้ก็หมายถึง ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใส่กับค่าความเครียดที่วัดได้ ซึ่งก็คือ สมาชิกแต่ละตัวในสเตรนคอมโพสิทเมตริกซ์ (C_s) แต่จะเห็นว่าสเตรนเกจแต่ละตัวก็จะมีค่าความไวต่อแรงแต่ละชนิดไม่เท่ากัน (สเตรนเกจมี 8 ชุด แรงมี 6 ชนิด) ดังนั้นในกรณีนี้จะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใส่กับค่าความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัดแรงทิศทางนั้น ซึ่งหากมีหลายชุดก็ให้นำค่าความไวทั้งหมดมาเฉลี่ยกัน

5. ค่าฮิสเทอรีซิส (hysteresis) คือ ค่าที่แสดงถึงความเสียทานภายในของอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งถ้าอุปกรณ์ตรวจวัดไม่มีแรงเสียทานภายในค่าที่วัดได้ขณะเพิ่มโหลดและลดโหลดจะเท่ากันพอดี ซึ่งถ้ามีน้อยก็ยิ่งดี

สำหรับลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักเพื่อทดลองหาค่าความถูกต้องและค่ารีพีทอะบิลิตี้จะต่างจากการใส่ก้อนน้ำหนัก ในตอนปรับเทียบค่าเล็กน้อยโดยในส่วนของภาระใส่แรง F_x และ F_y นั้นจะกระทำที่ปลายสุดของนิ้ว (finger) (ดูรูปที่ 6.2 ประกอบ) ซึ่งน่าจะเหมือนลักษณะการนำไปใช้จริงมากกว่า โดยการใส่แรง F_x และ F_y นั้นจะทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นด้วย โดยการใส่แรง F_x ก็จะทำให้เกิดโมเมนต์ M_y ถ้าใส่แรง F_y ก็จะทำให้เกิดโมเมนต์ M_x ลักษณะการใส่แรงในแนวแกน x และ y นั้นจะแสดงดังรูปที่ 6.10 ส่วนการใส่แรง F_z และโมเมนต์ M_z นั้นจะมีลักษณะเหมือนกับตอนทดลองเพื่อปรับเทียบค่าดังรูปที่ 6.6 6.7 และ 6.9

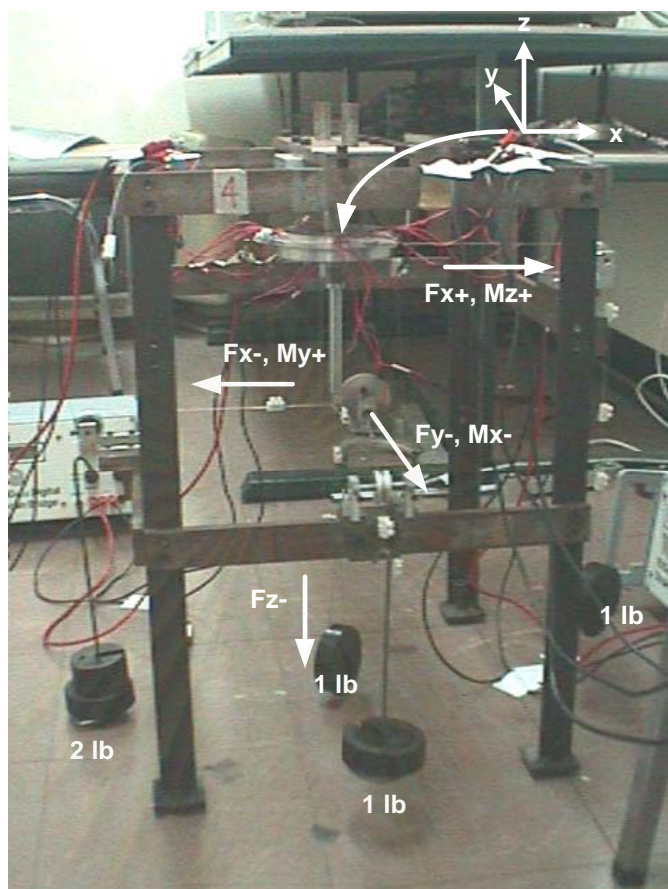


รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะการใส่แรง (F_x & M_y) และ (F_y & M_x) ในการทดลองหาค่าความถูกต้อง และรีพีทอะบิลิตี้

6.3 การทดลองวัดแรงและโมเมนต์ทุกทิศทางพร้อม ๆ กัน

จะเป็นการทดสอบใส่แรงและโมเมนต์ทุกชนิดเพื่อดูว่า อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ใช้สามารถวัดแรงและโมเมนต์ทุกชนิดที่ใส่เข้าไปได้ถูกต้องมากน้อยเพียงใด ลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.11 ซึ่งทำให้เกิดแรงและโมเมนต์ดังนี้ $F_x -4.448$ นิวตัน $F_y -4.448$ นิวตัน $F_z -4.448$ นิวตัน $M_x -0.645$ นิวตันเมตร $M_y 1.290$ นิวตันเมตร และ $M_z 0.247$ นิวตันเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.11 แสดงลักษณะการใส่แรงและโมเมนต์ทุกทิศทางและขนาดก่อนนำหนักที่ใช้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

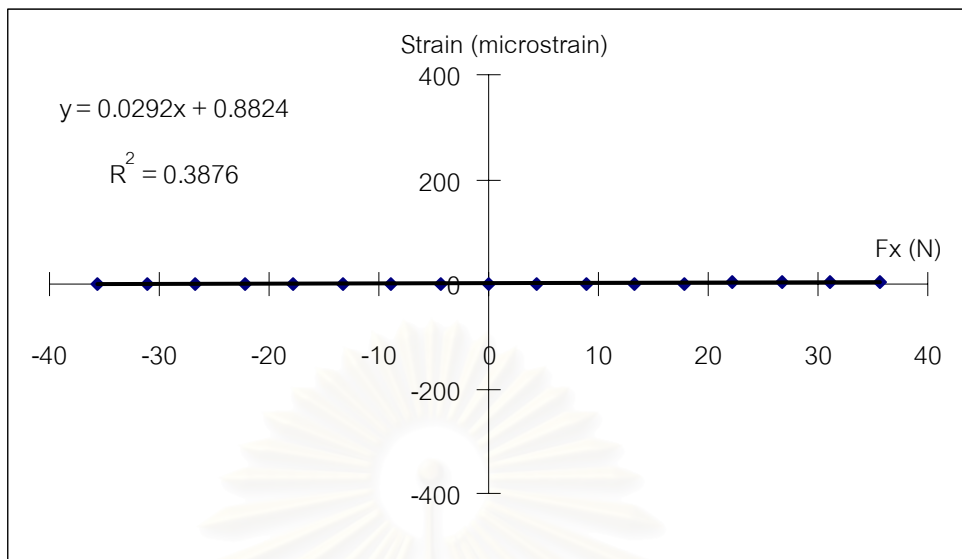
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

7.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจวัดแรง Sensor III

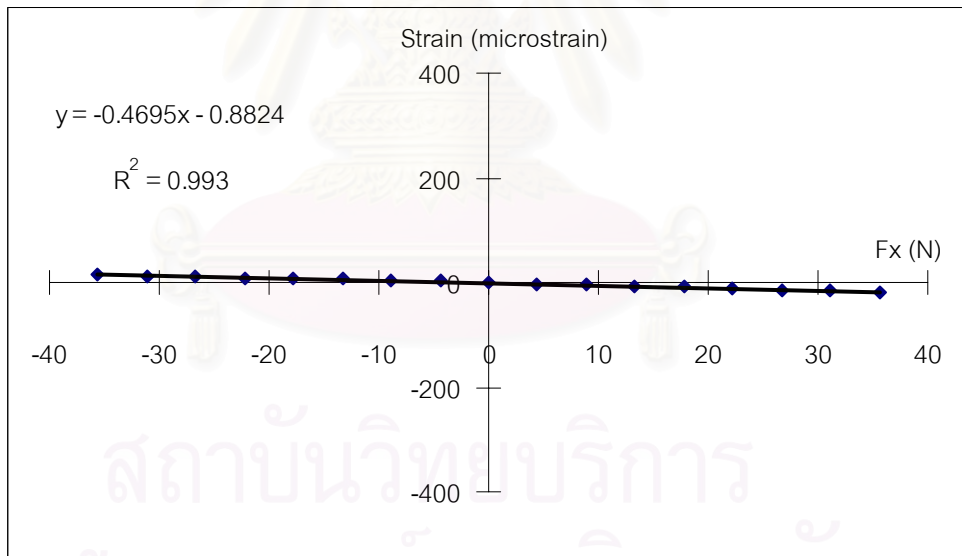
ตารางที่ 7.1 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง Fx กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.5

น้ำหนัก (lbs)	Fx (N)	ε1 μstrain	ε2 μstrain	ε3 μstrain	ε4 μstrain	ε5 μstrain	ε6 μstrain	ε7 μstrain	ε8 μstrain
-8	-35.58	1	15	-295	12	-1	-29	289	7
-7	-31.14	1	13	-258	11	-1	-25	252	6
-6	-26.69	1	11	-220	9	-1	-21	216	5
-5	-22.24	0	9	-183	8	0	-18	180	4
-4	-17.79	0	7	-146	6	0	-14	144	3
-3	-13.34	0	6	-109	4	0	-10	107	2
-2	-8.90	0	4	-73	3	0	-7	72	1
-1	-4.45	0	2	-36	1	0	-3	36	1
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.45	0	-2	36	-1	0	0	-35	0
2	8.90	0	-4	72	-2	0	0	-72	-1
3	13.34	1	-6	108	-4	0	-1	-108	-2
4	17.79	1	-9	145	-5	0	-1	-145	-3
5	22.24	2	-11	182	-6	0	0	-182	-4
6	26.69	2	-14	218	-8	0	0	-219	-5
7	31.14	3	-17	254	-10	0	0	-255	-6
8	35.58	3	-19	291	-11	0	0	-292	-7

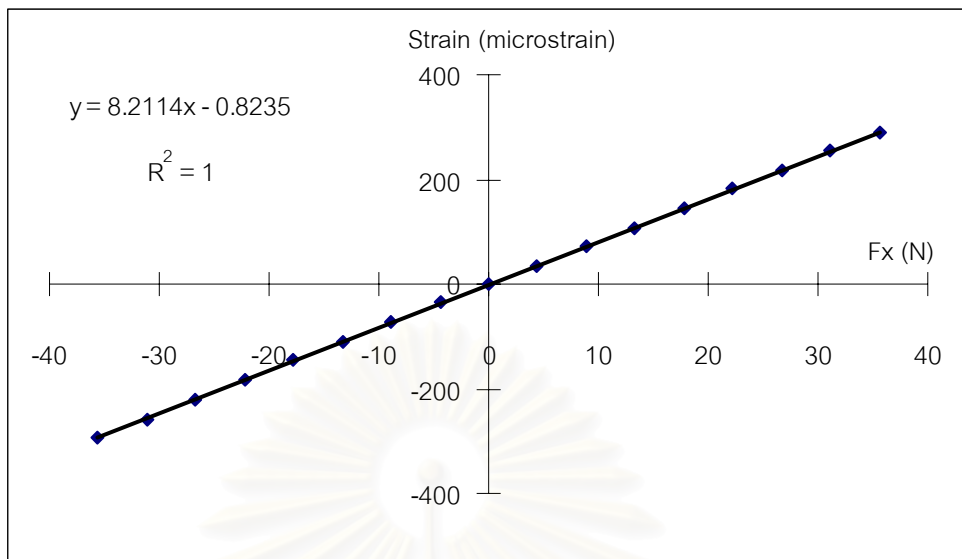
จากตารางที่ 7.1 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.1 - 7.8 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าชุดสเตรนเกจที่ 3 กับ ชุดสเตรนเกจที่ 7 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่แรง Fx ลงไป



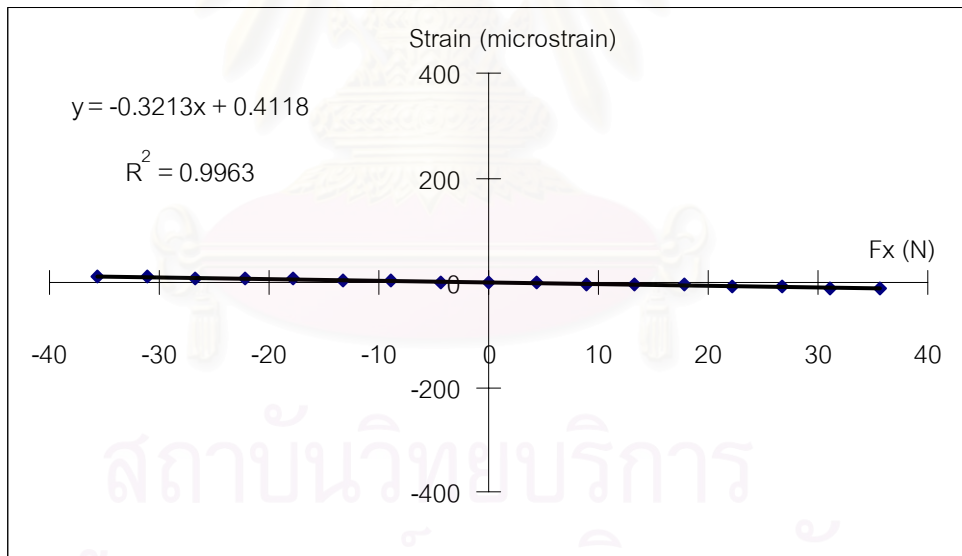
รูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



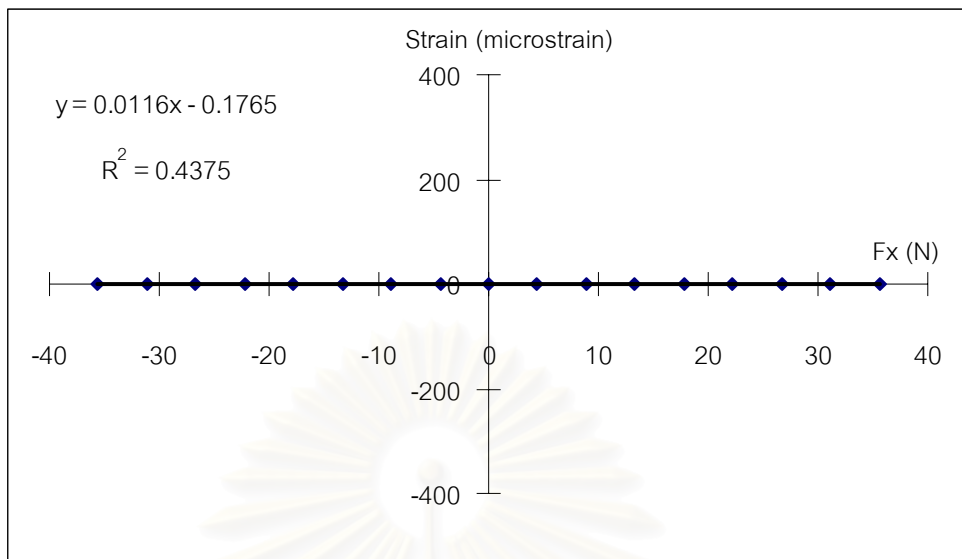
รูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



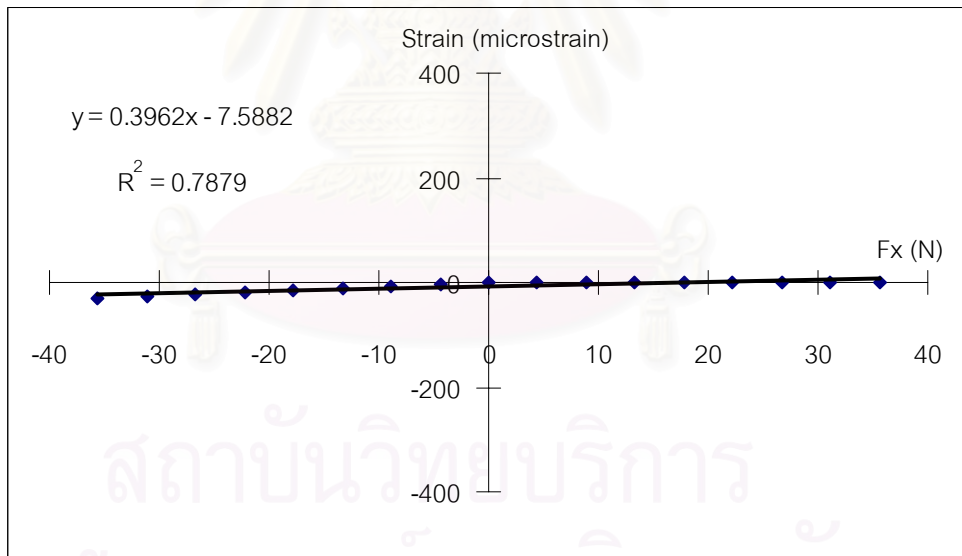
รูปที่ 7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



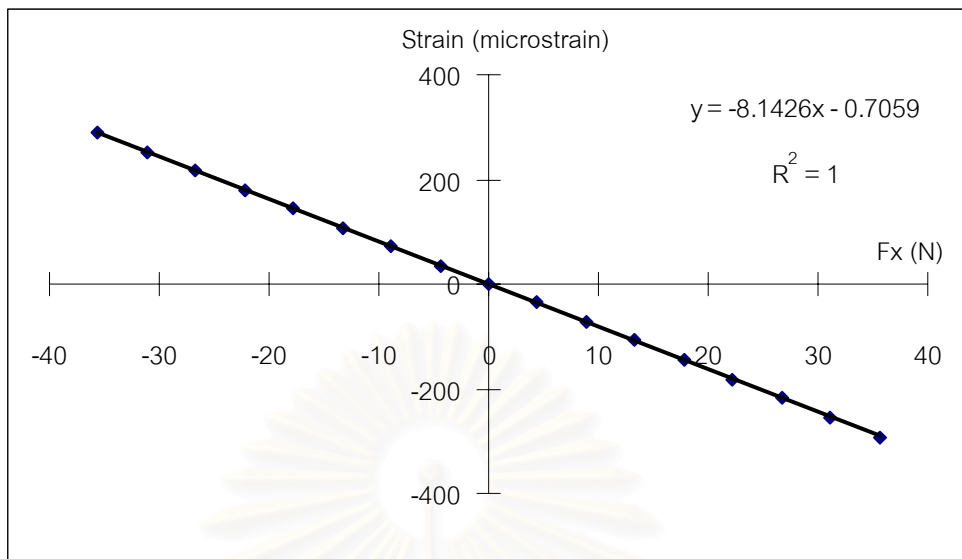
รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



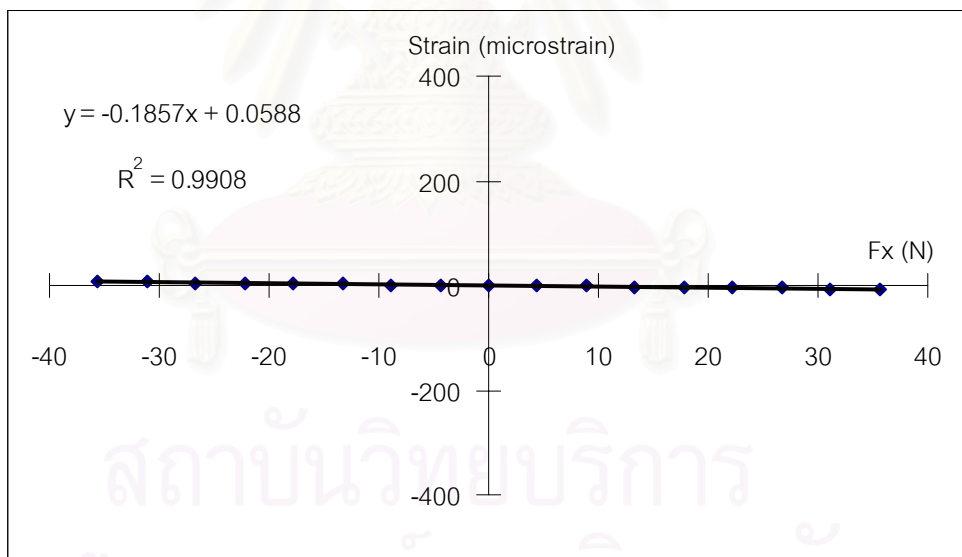
รูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7

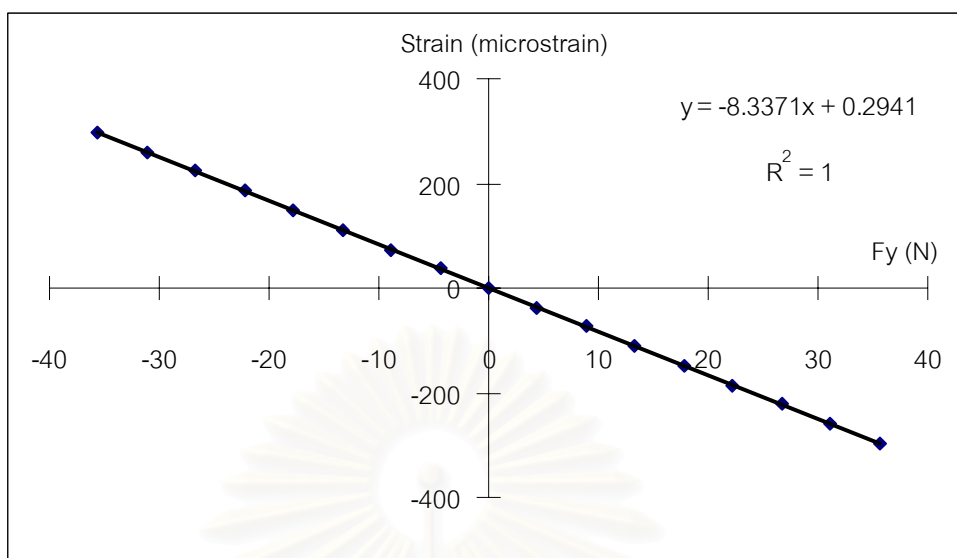


รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

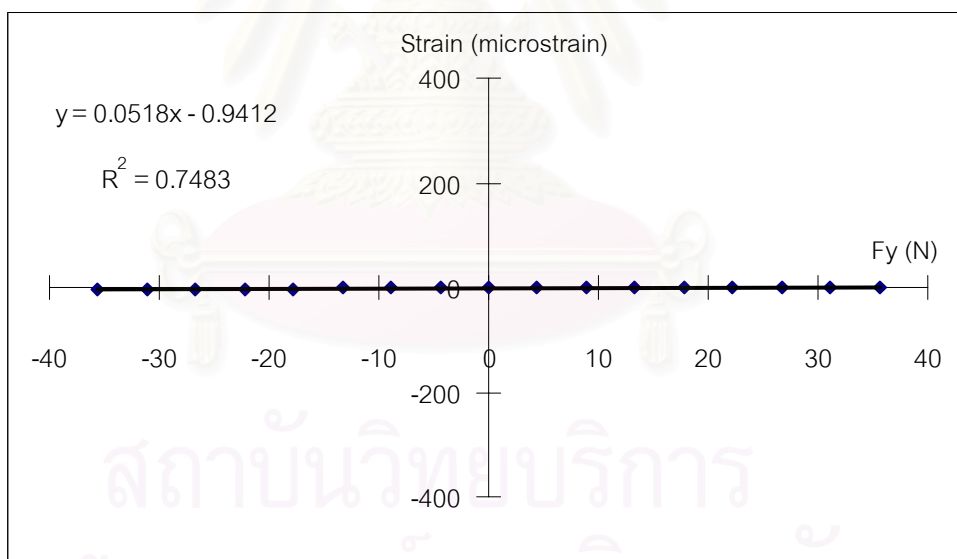
ตารางที่ 7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง F_y กับความเครียดที่วัดได้จากชุด
 สเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.5

น้ำหนัก (lbs)	F_y (N)	ϵ_1 μstrain	ϵ_2 μstrain	ϵ_3 μstrain	ϵ_4 μstrain	ϵ_5 μstrain	ϵ_6 μstrain	ϵ_7 μstrain	ϵ_8 μstrain
-8	-35.58	298	-4	0	20	-301	-10	-5	-38
-7	-31.14	260	-3	0	18	-264	-9	-4	-34
-6	-26.69	223	-3	0	16	-226	-7	-3	-30
-5	-22.24	186	-2	0	14	-189	-6	-2	-26
-4	-17.79	148	-2	0	12	-151	-4	-2	-21
-3	-13.34	111	-1	0	9	-113	-3	-1	-17
-2	-8.90	74	-1	0	6	-76	-1	0	-12
-1	-4.45	37	0	0	3	-38	0	0	-7
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.45	-37	0	-1	-5	37	0	0	3
2	8.90	-74	0	-2	-11	74	1	0	6
3	13.34	-111	0	-2	-17	111	2	0	10
4	17.79	-148	0	-3	-23	148	3	0	13
5	22.24	-185	0	-4	-29	184	4	0	17
6	26.69	-222	0	-5	-34	222	5	0	20
7	31.14	-259	0	-5	-40	259	6	0	24
8	35.58	-296	0	-6	-47	296	7	0	28

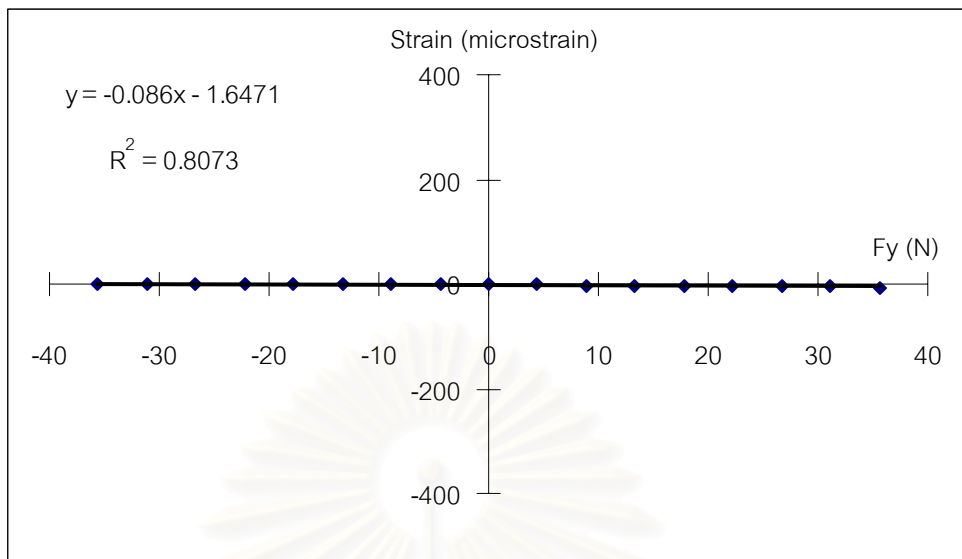
จากตารางที่ 7.2 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับ
 ค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.9 - 7.16 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าชุดสเตรนเกจ
 ที่ 1 กับ ชุดสเตรนเกจที่ 5 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่แรง F_y ลงไป



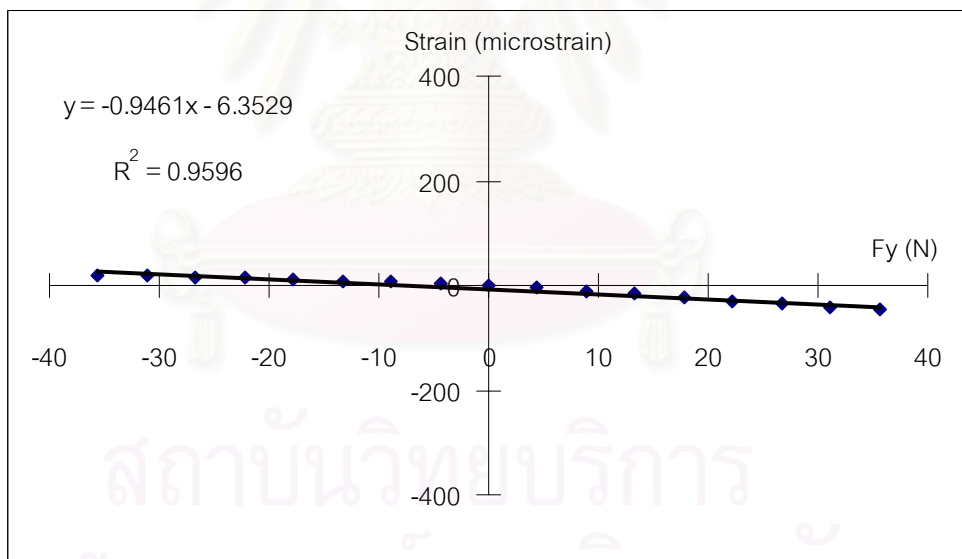
รูปที่ 7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



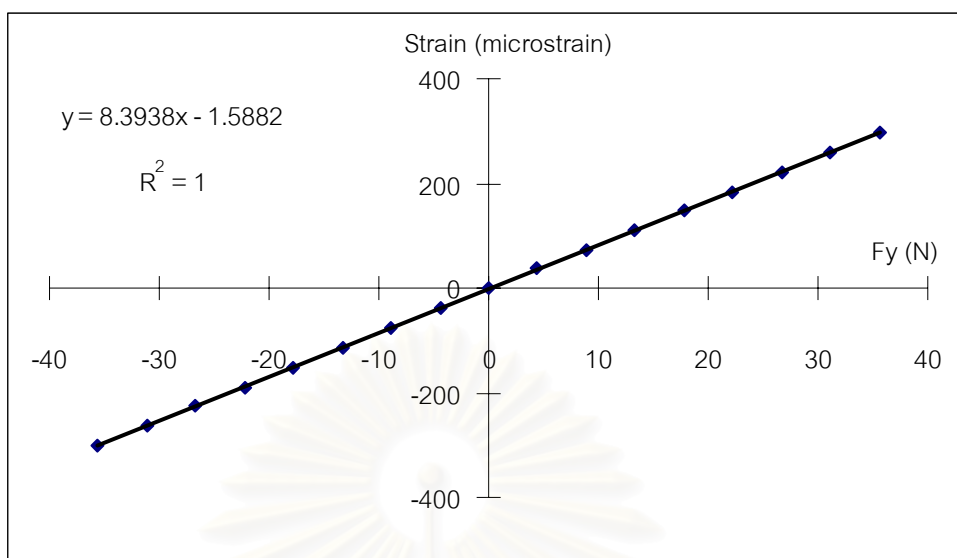
รูปที่ 7.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



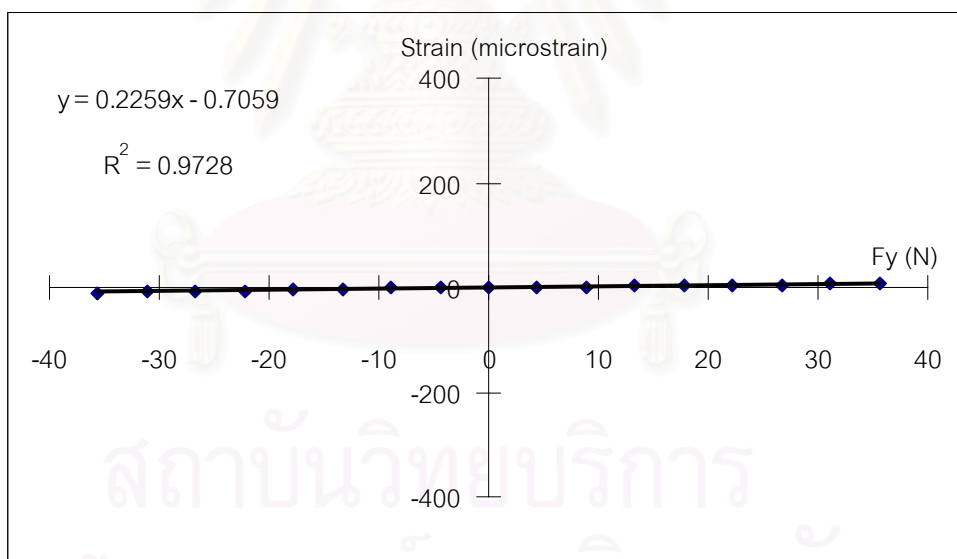
รูปที่ 7.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



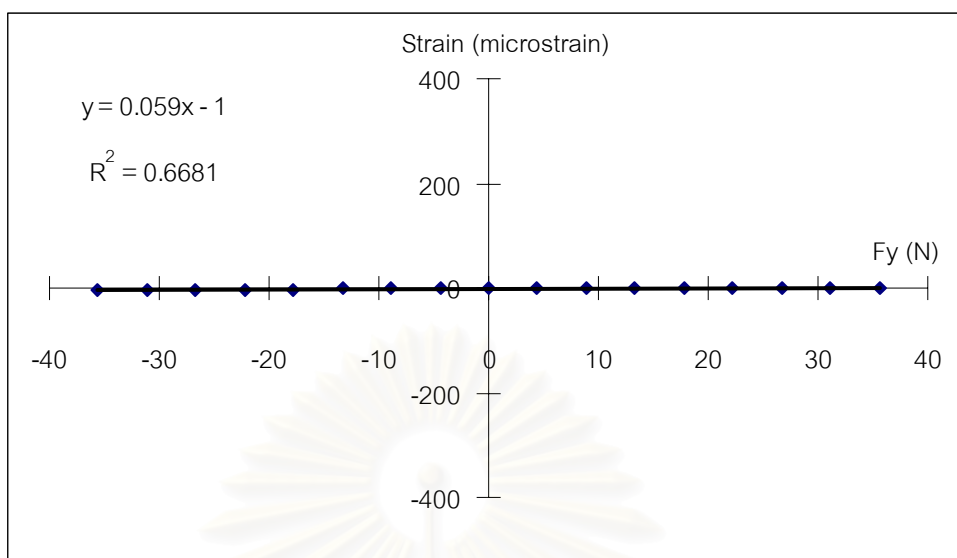
รูปที่ 7.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



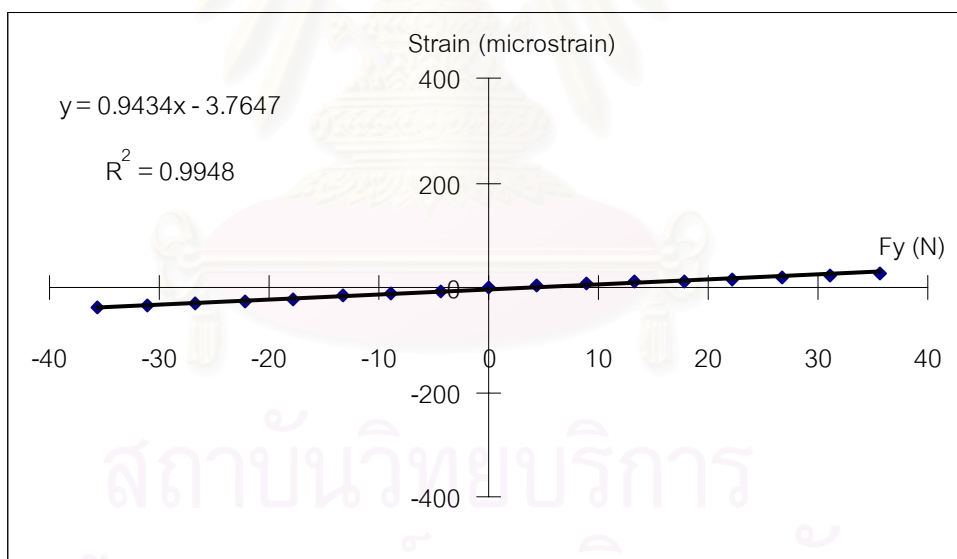
รูปที่ 7.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7

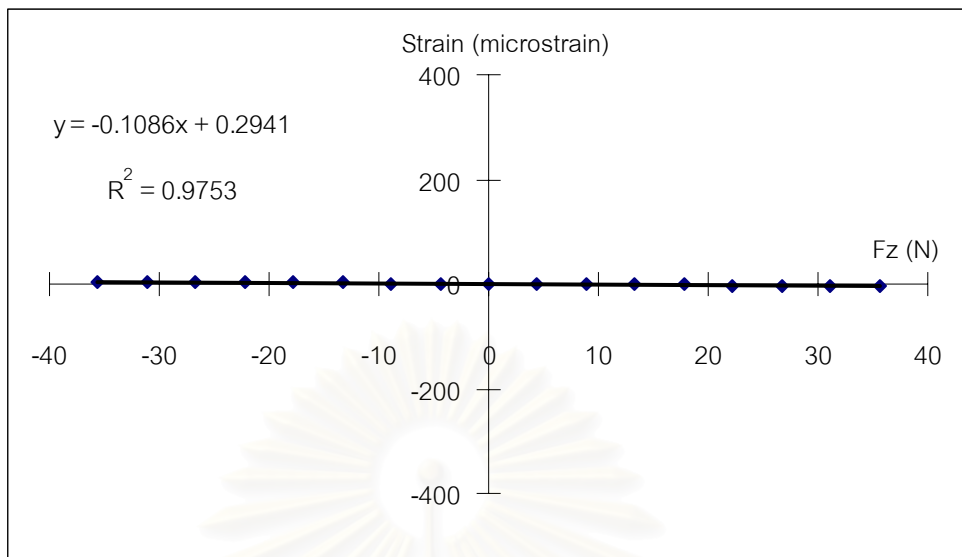


รูปที่ 7.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_y กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

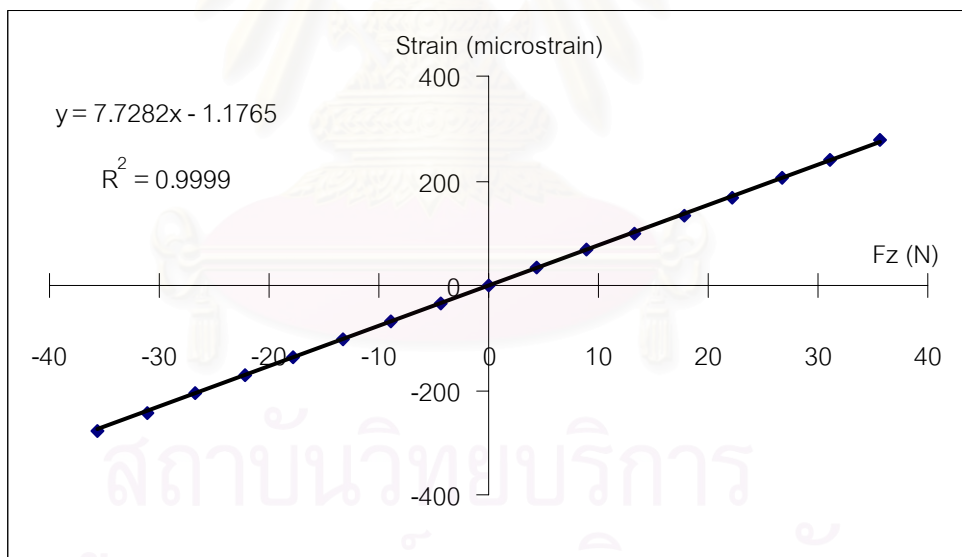
ตารางที่ 7.3 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรง Fz กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.6 และ 6.7

น้ำหนัก (lbs)	Fz (N)	ϵ_1 μstrain	ϵ_2 μstrain	ϵ_3 μstrain	ϵ_4 μstrain	ϵ_5 μstrain	ϵ_6 μstrain	ϵ_7 μstrain	ϵ_8 μstrain
-8	-35.58	4	-278	-3	-290	21	-321	-6	-297
-7	-31.14	4	-242	-2	-253	19	-281	-5	-259
-6	-26.69	3	-207	-2	-217	17	-241	-4	-222
-5	-22.24	3	-173	-2	-181	14	-200	-3	-185
-4	-17.79	2	-138	-1	-144	11	-160	-2	-148
-3	-13.34	2	-103	-1	-109	8	-120	-1	-111
-2	-8.90	1	-69	-1	-73	5	-80	0	-73
-1	-4.45	0	-34	0	-36	3	-40	0	-36
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.45	0	35	0	37	-2	39	0	36
2	8.90	0	67	1	75	-4	78	0	73
3	13.34	-1	99	1	112	-7	117	1	111
4	17.79	-1	132	2	149	-10	157	2	149
5	22.24	-2	168	3	187	-13	197	3	186
6	26.69	-3	205	3	226	-15	236	4	224
7	31.14	-3	241	4	265	-18	276	5	262
8	35.58	-4	277	4	303	-21	318	6	300

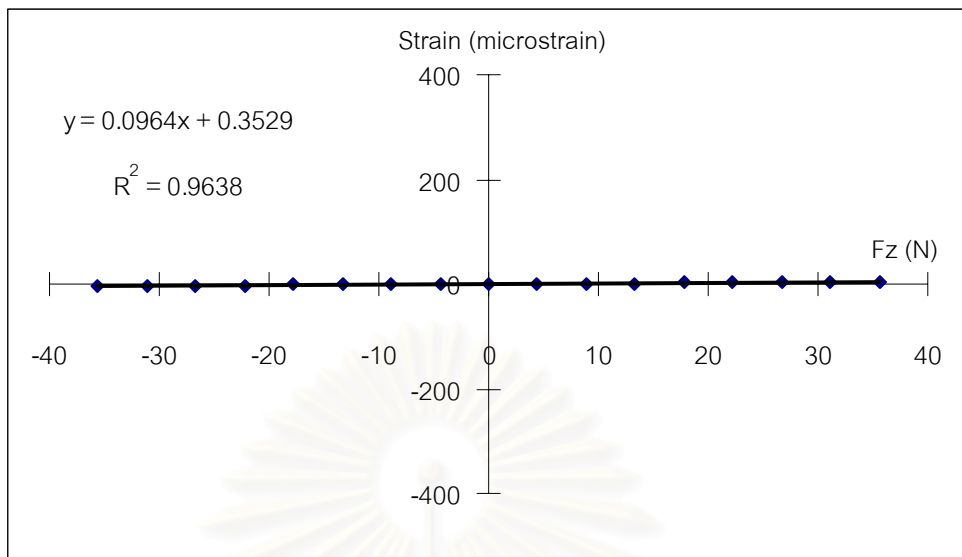
จากตารางที่ 7.3 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.17- 7.24 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าชุดสเตรนเกจที่ 2 4 6 และ 8 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่แรง Fz ลงไป



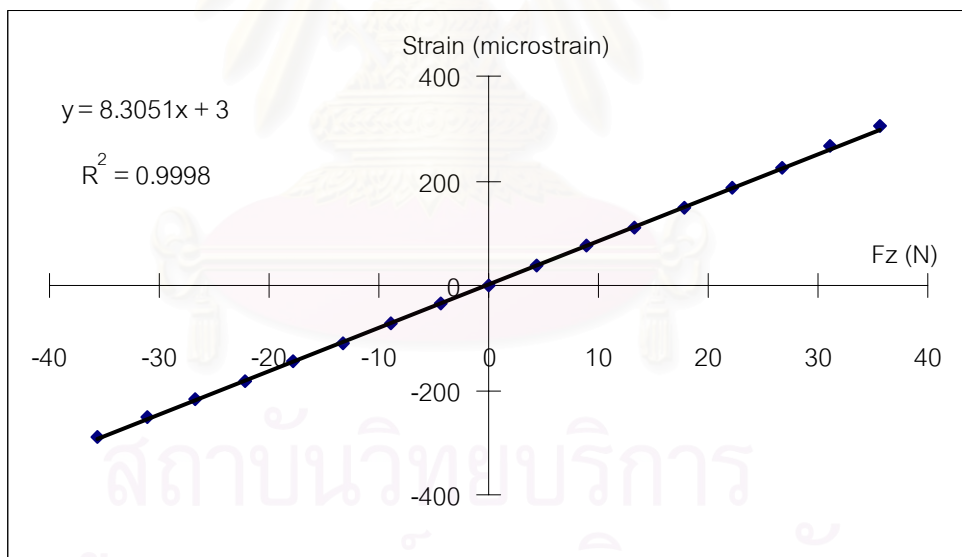
รูปที่ 7.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



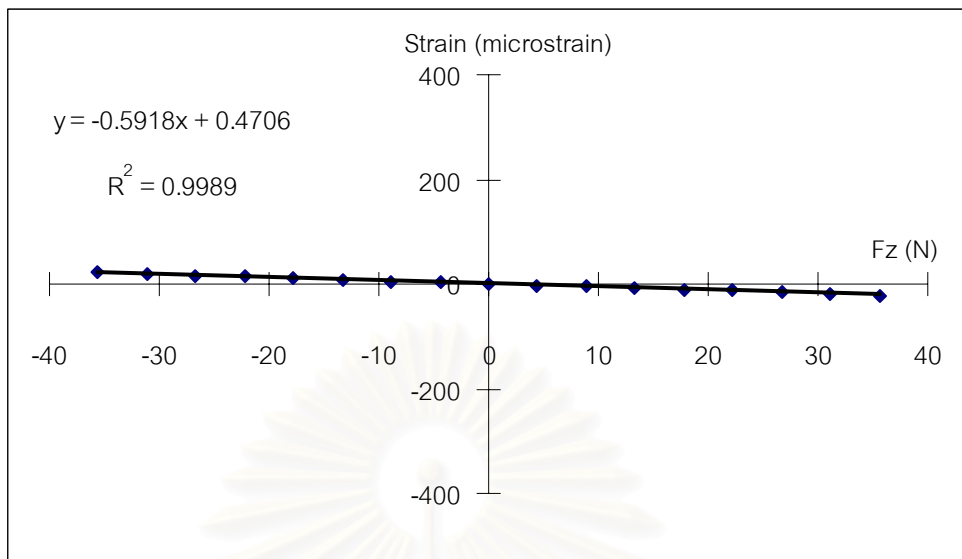
รูปที่ 7.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



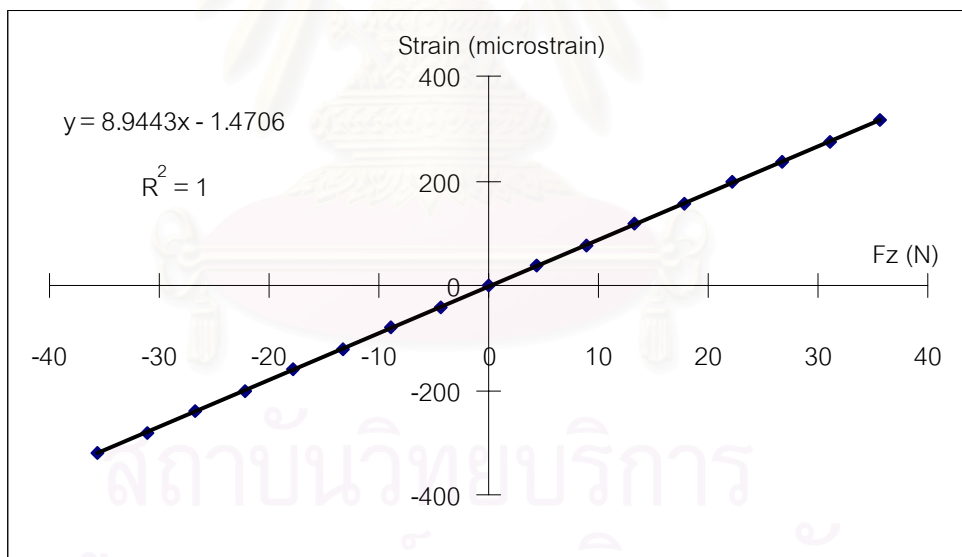
รูปที่ 7.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



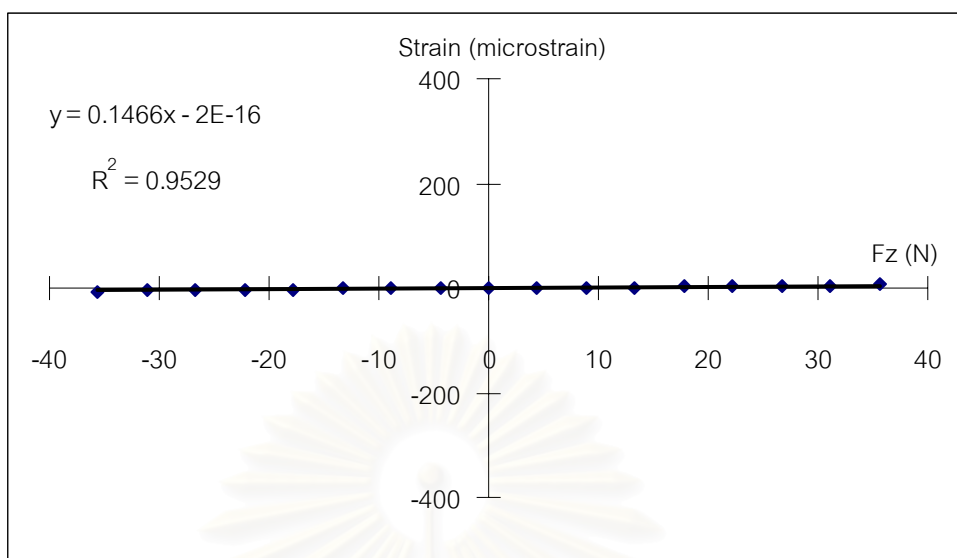
รูปที่ 7.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



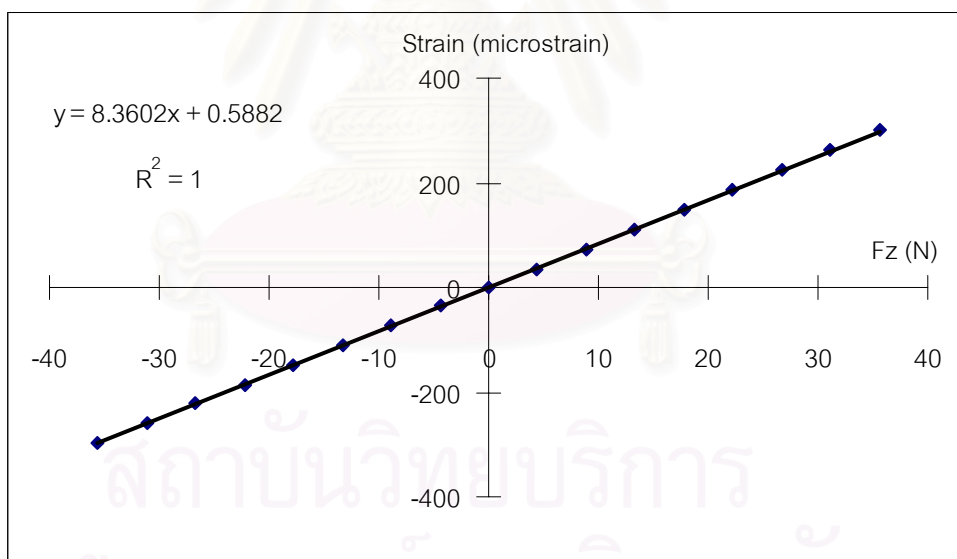
รูปที่ 7.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7

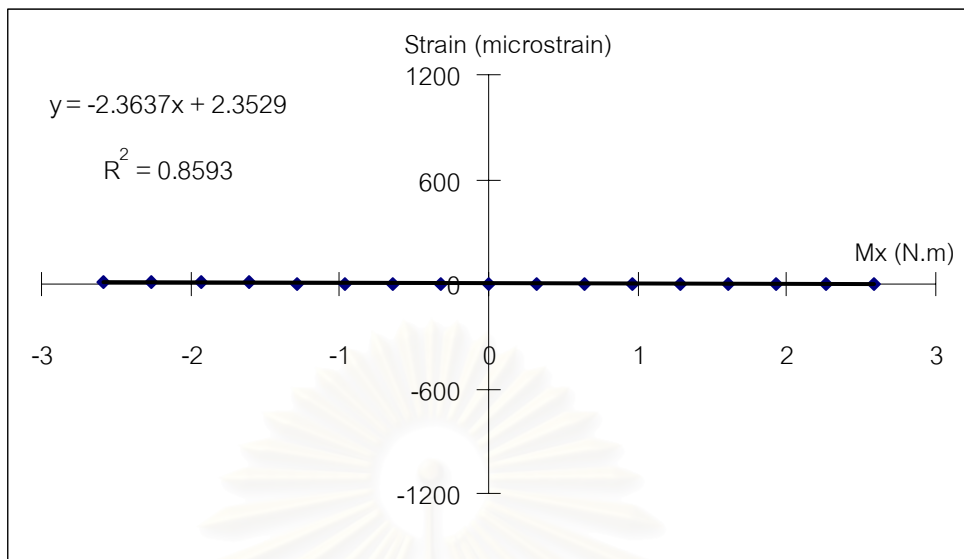


รูปที่ 7.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง Fz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

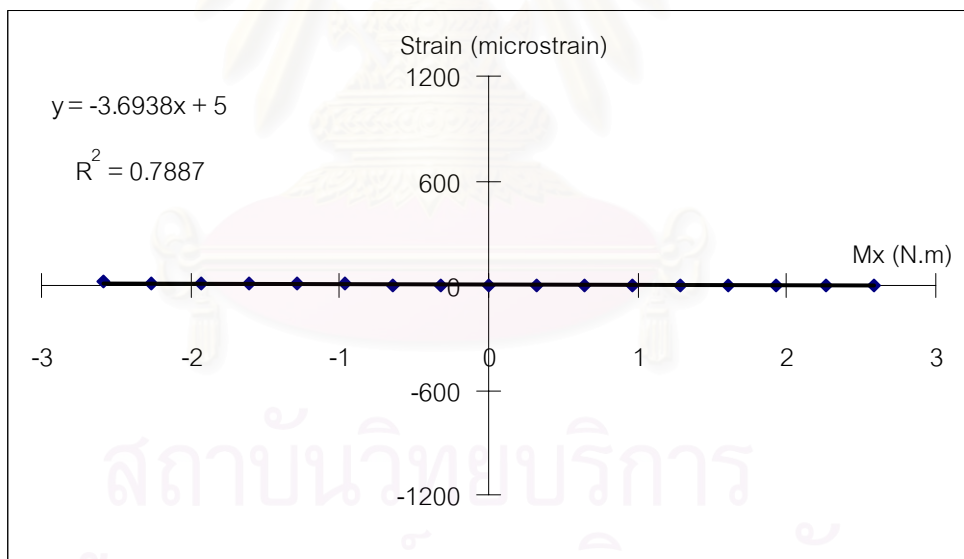
ตารางที่ 7.4 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ Mx กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.8

น้ำหนัก (lbs)	Mx (N.m)	ϵ_1 μstrain	ϵ_2 μstrain	ϵ_3 μstrain	ϵ_4 μstrain	ϵ_5 μstrain	ϵ_6 μstrain	ϵ_7 μstrain	ϵ_8 μstrain
-4	-2.58	11	19	-15	-1067	-3	-7	13	1044
-3.5	-2.26	9	17	-13	-932	-2	-6	11	910
-3	-1.93	8	14	-11	-800	-2	-5	10	782
-2.5	-1.61	7	12	-9	-664	-2	-4	8	650
-2	-1.29	5	10	-7	-532	-1	-3	6	524
-1.5	-0.97	4	7	-5	-397	-1	-2	4	390
-1	-0.64	2	4	-3	-264	0	-1	3	263
-0.5	-0.32	0	2	-1	-133	0	0	1	129
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.32	0	0	1	133	0	-1	-1	-130
1	0.64	0	0	3	265	0	-2	-4	-262
1.5	0.97	0	0	4	398	1	-3	-6	-391
2	1.29	0	0	6	529	1	-4	-8	-521
2.5	1.61	-1	0	7	662	2	-5	-10	-651
3	1.93	-1	0	9	795	2	-5	-12	-785
3.5	2.26	-2	0	12	928	2	-6	-14	-915
4	2.58	-2	0	14	1063	3	-7	-16	-1046

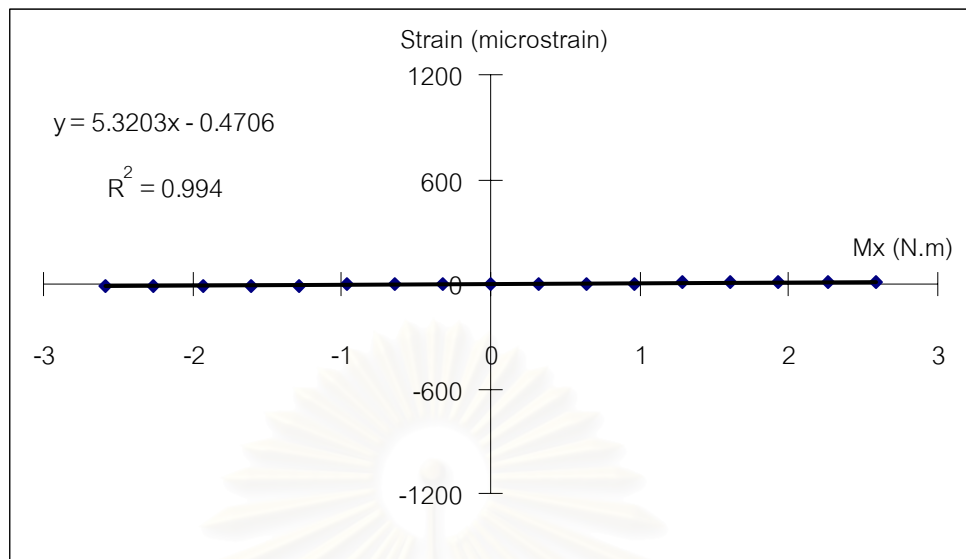
จากตารางที่ 7.4 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.25 - 7.32 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าชุดสเตรนเกจที่ 4 กับ ชุดสเตรนเกจที่ 8 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่โมเมนต์ Mx ลงไป



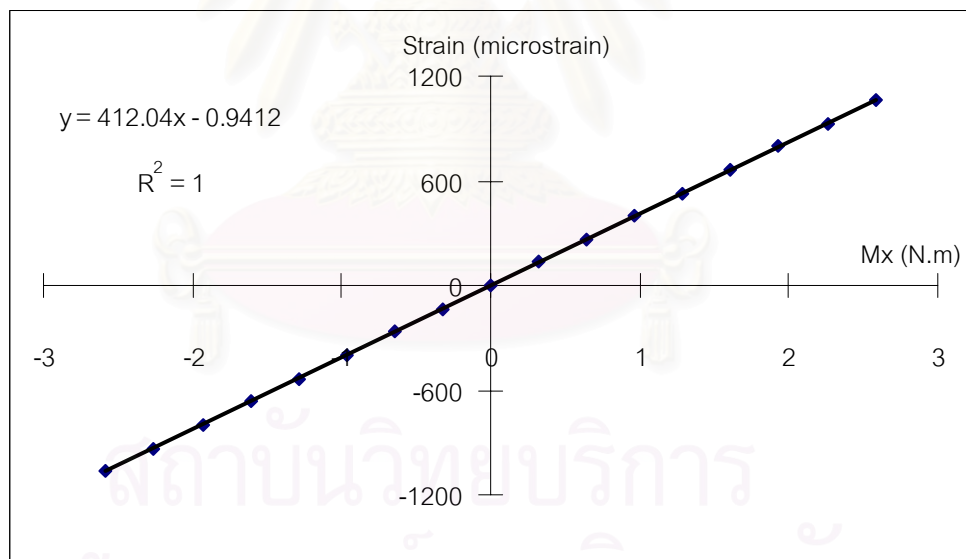
รูปที่ 7.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



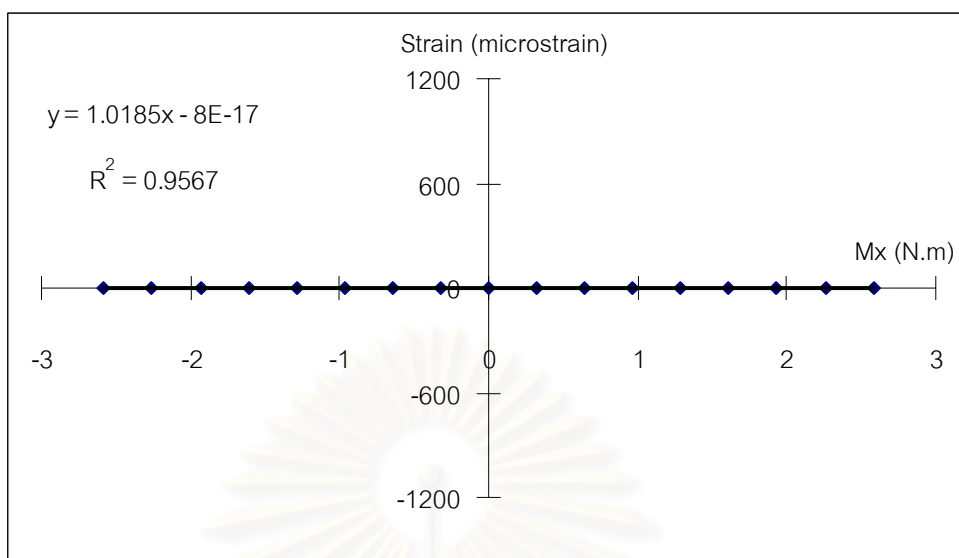
รูปที่ 7.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



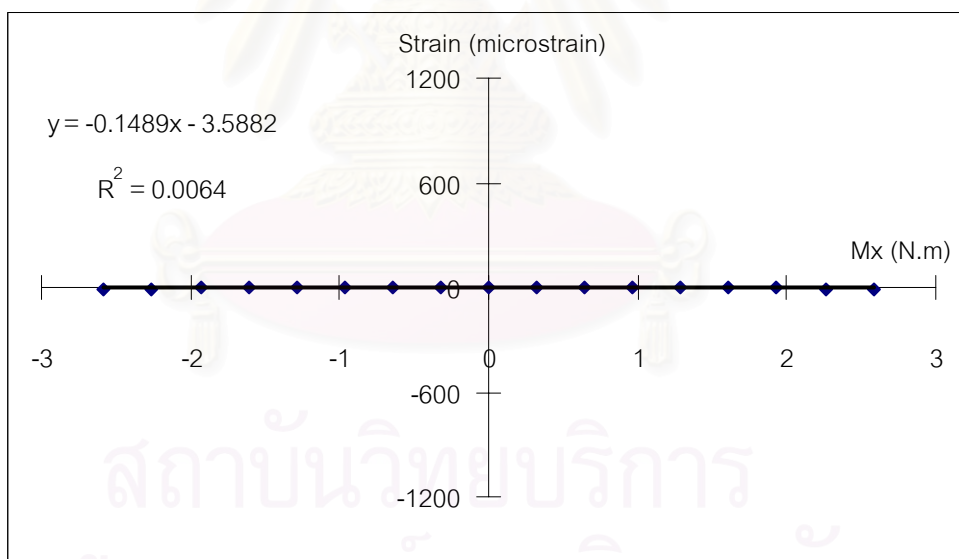
รูปที่ 7.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



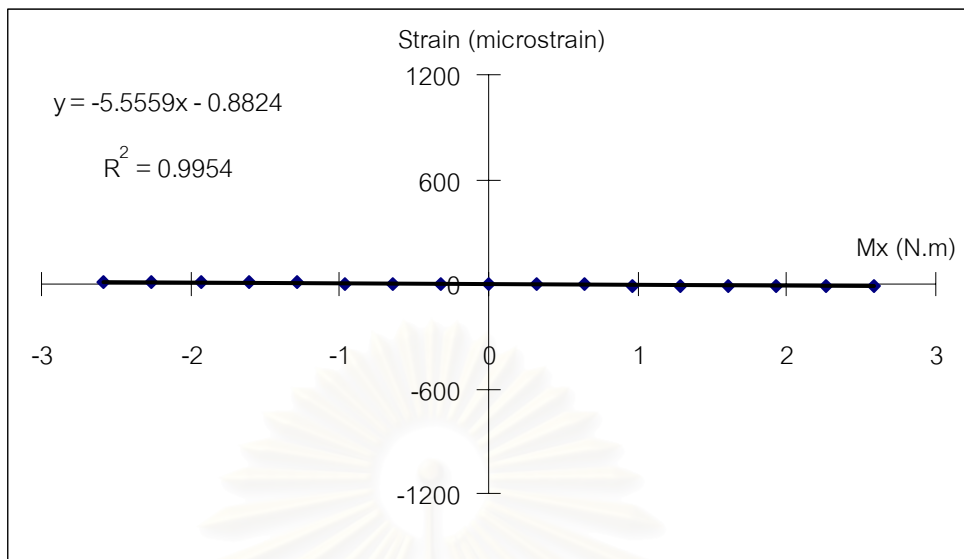
รูปที่ 7.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



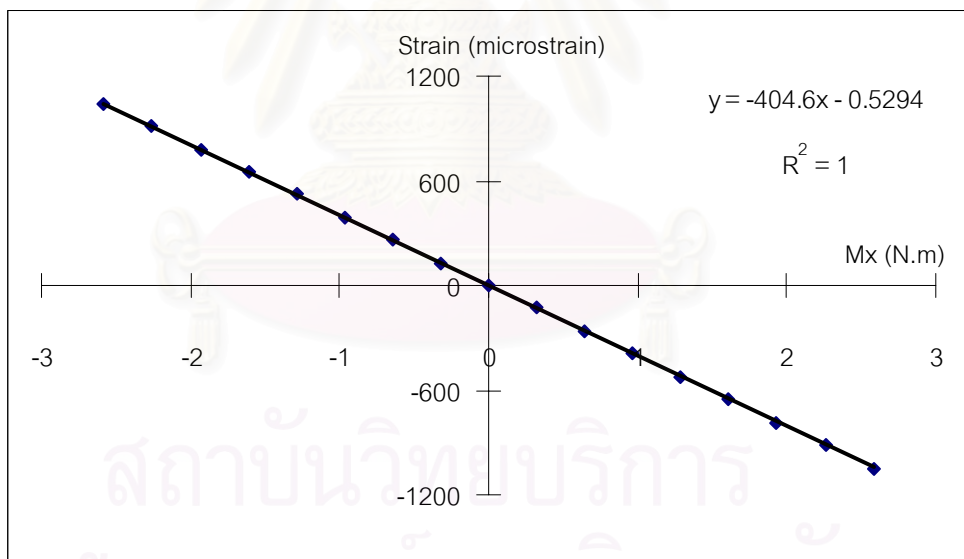
รูปที่ 7.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7

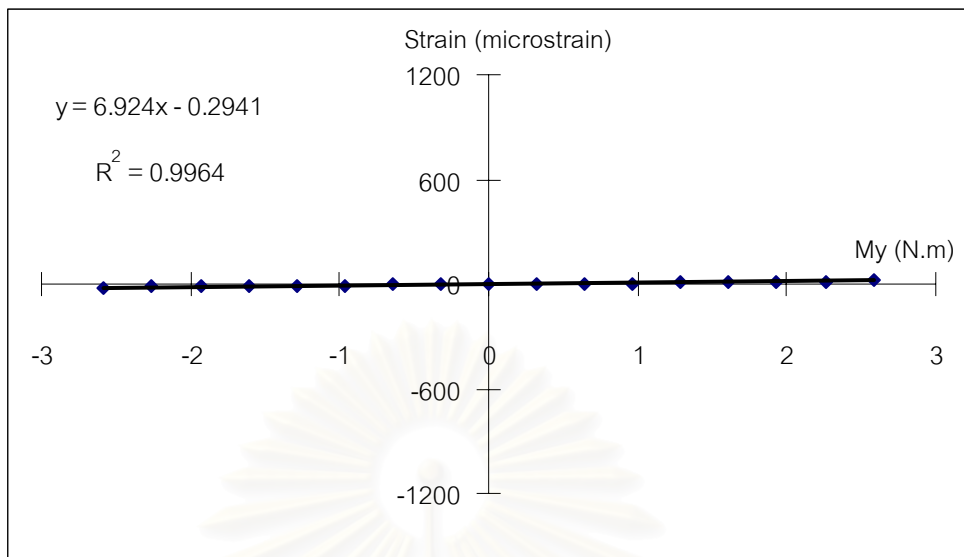


รูปที่ 7.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mx กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

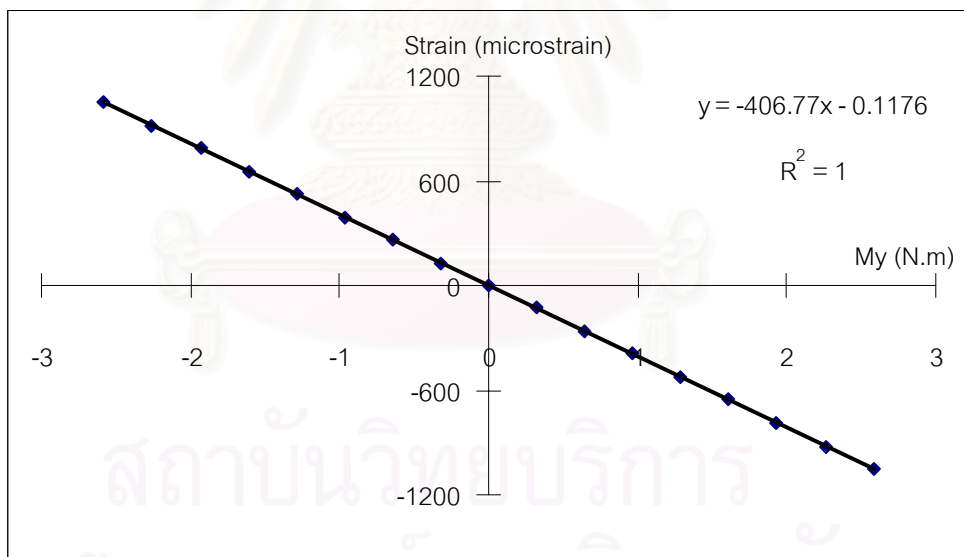
ตารางที่ 7.5 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ My กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.8

น้ำหนัก (lbs)	My (N.m)	ϵ_1 μstrain	ϵ_2 μstrain	ϵ_3 μstrain	ϵ_4 μstrain	ϵ_5 μstrain	ϵ_6 μstrain	ϵ_7 μstrain	ϵ_8 μstrain
-4	-2.58	-18	1051	-5	34	65	-1054	-2	14
-3.5	-2.26	-16	916	-4	30	57	-922	-1	12
-3	-1.93	-14	788	-2	25	49	-793	-1	10
-2.5	-1.61	-11	655	-2	21	40	-658	-1	8
-2	-1.29	-9	525	-1	17	32	-527	0	7
-1.5	-0.97	-7	392	0	13	24	-395	0	5
-1	-0.64	-4	262	0	8	16	-262	0	3
-0.5	-0.32	-2	129	0	4	8	-131	0	1
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.32	1	-130	0	-4	-8	130	0	0
1	0.64	3	-263	1	-8	-16	260	0	0
1.5	0.97	5	-392	1	-13	-25	386	0	-1
2	1.29	8	-522	2	-17	-33	517	0	-1
2.5	1.61	11	-654	2	-21	-42	645	0	-2
3	1.93	14	-787	3	-25	-50	778	0	-2
3.5	2.26	16	-920	4	-29	-59	907	0	-3
4	2.58	18	-1052	5	-33	-67	1038	0	-3

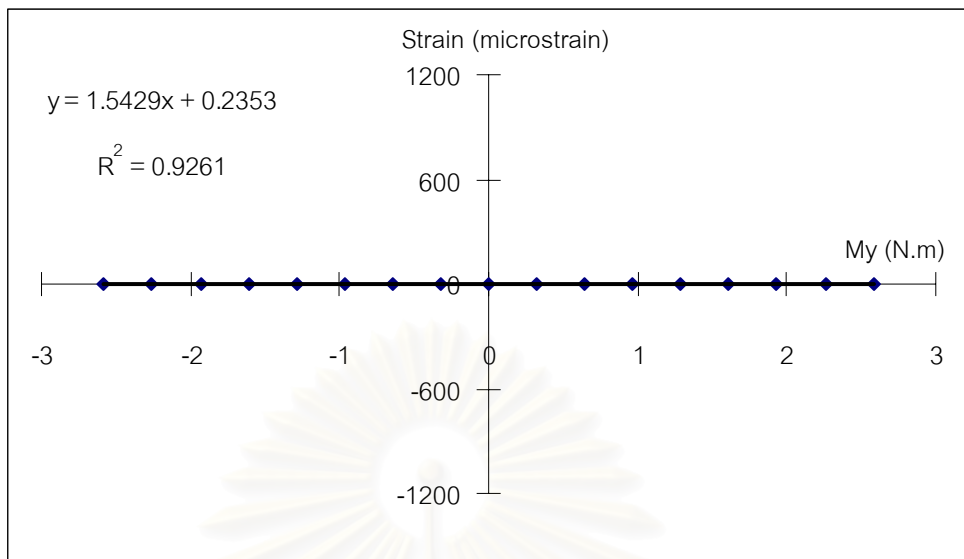
จากตารางที่ 7.5 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.33 - 7.40 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าชุดสเตรนเกจที่ 2 กับ ชุดสเตรนเกจที่ 6 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่โมเมนต์ My ลงไป



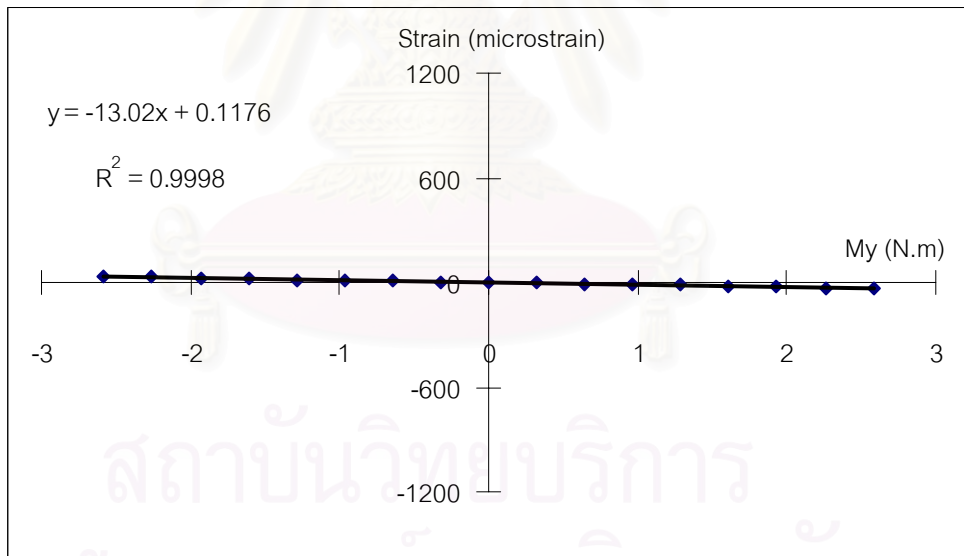
รูปที่ 7.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



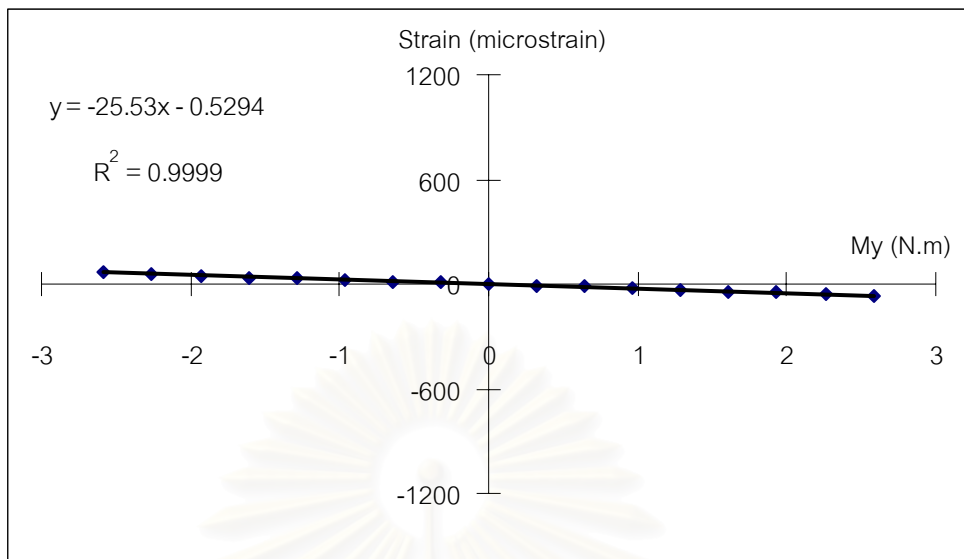
รูปที่ 7.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



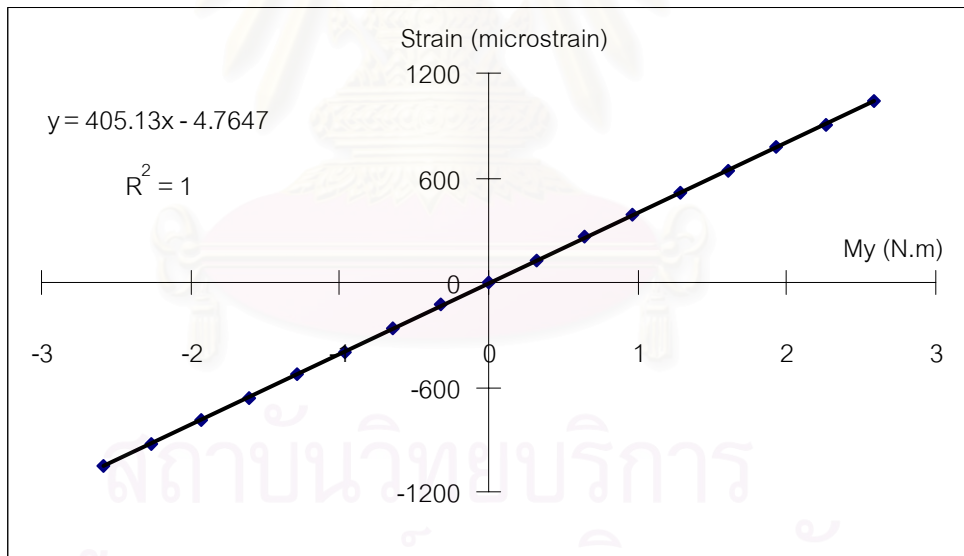
รูปที่ 7.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



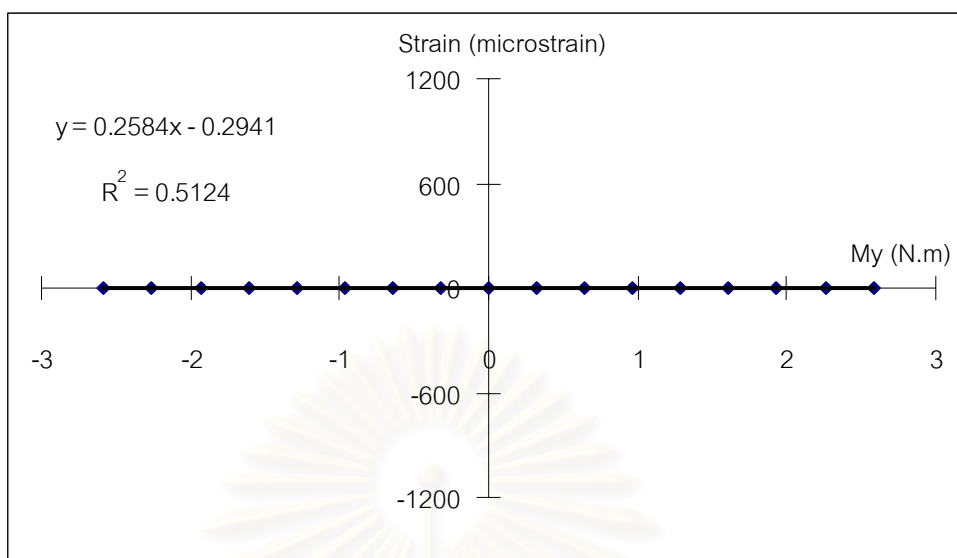
รูปที่ 7.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



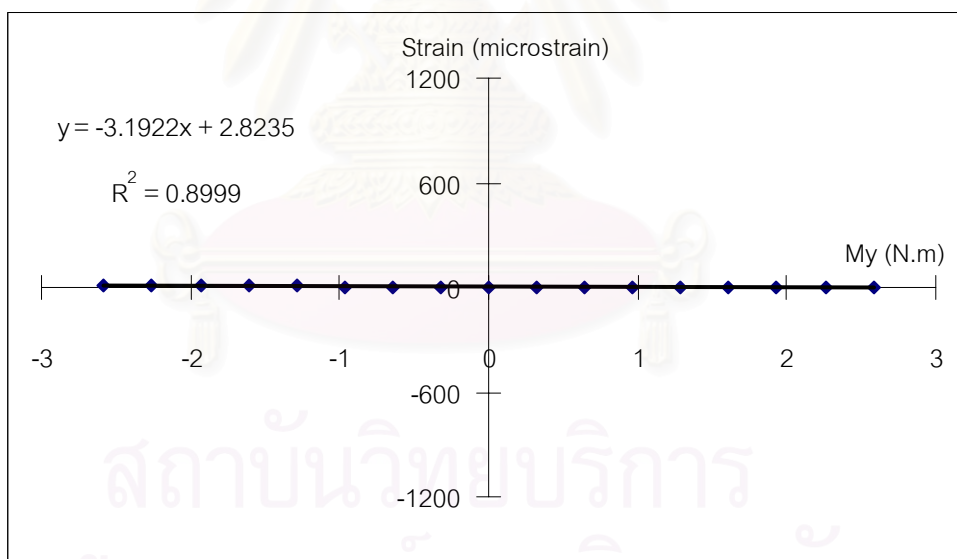
รูปที่ 7.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7

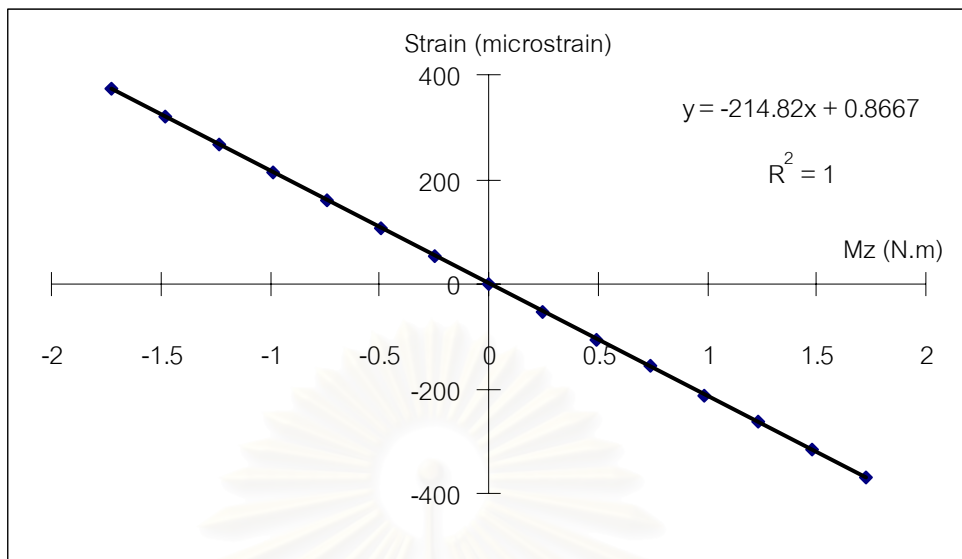


รูปที่ 7.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ My กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

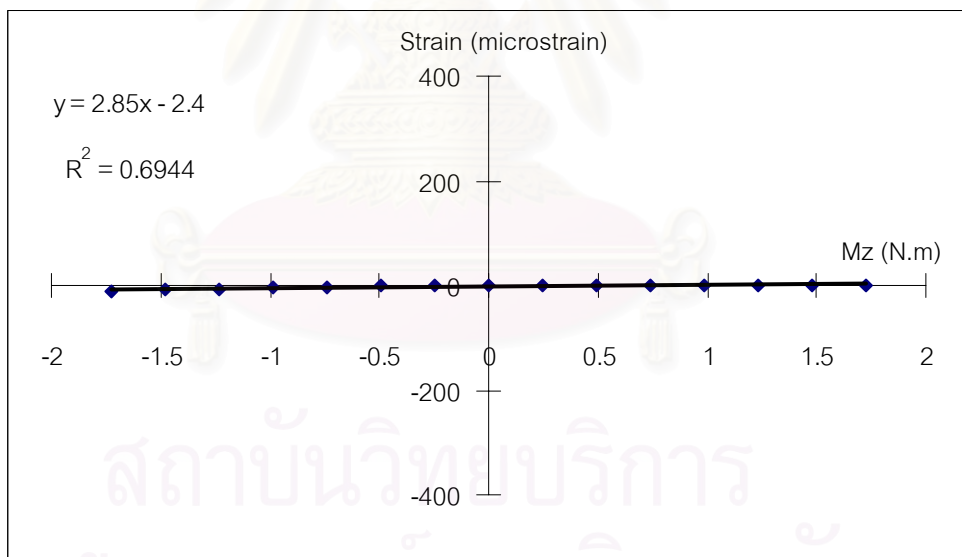
ตารางที่ 7.6 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ Mz กับความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดงดังรูปที่ 6.9

น้ำหนัก (lbs)	Mz (N.m)	ϵ_1 μstrain	ϵ_2 μstrain	ϵ_3 μstrain	ϵ_4 μstrain	ϵ_5 μstrain	ϵ_6 μstrain	ϵ_7 μstrain	ϵ_8 μstrain
-3.5	-1.73	374	-11	379	-23	372	9	365	7
-3	-1.48	320	-9	325	-19	318	8	312	6
-2.5	-1.23	266	-7	270	-16	265	6	260	5
-2	-0.99	213	-5	217	-13	213	4	208	4
-1.5	-0.74	159	-3	163	-9	160	3	156	3
-1	-0.49	106	-1	110	-6	108	2	106	2
-0.5	-0.25	53	0	55	-3	54	0	53	1
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.25	-53	0	-52	1	-52	0	-51	-1
1	0.49	-106	0	-105	3	-104	-2	-104	-4
1.5	0.74	-158	0	-157	5	-156	-3	-155	-6
2	0.99	-212	0	-210	7	-208	-6	-208	-8
2.5	1.23	-263	0	-262	8	-260	-8	-259	-10
3	1.48	-317	0	-316	9	-312	-10	-311	-12
3.5	1.73	-369	0	-369	11	-366	-12	-364	-15

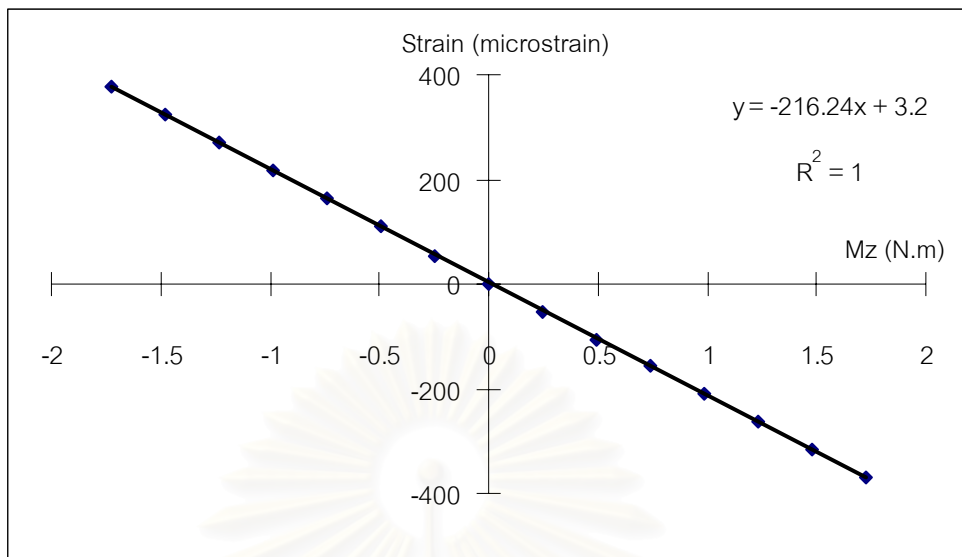
จากตารางที่ 7.6 จะนำไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดที่ได้จากชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ดังรูปที่ 7.41 - 7.48 ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าชุดสเตรนเกจที่ 1 3 5 และ 7 จะเป็นชุดสเตรนเกจที่เกิดความเครียดมากเมื่อใส่โมเมนต์ Mz ลงไป



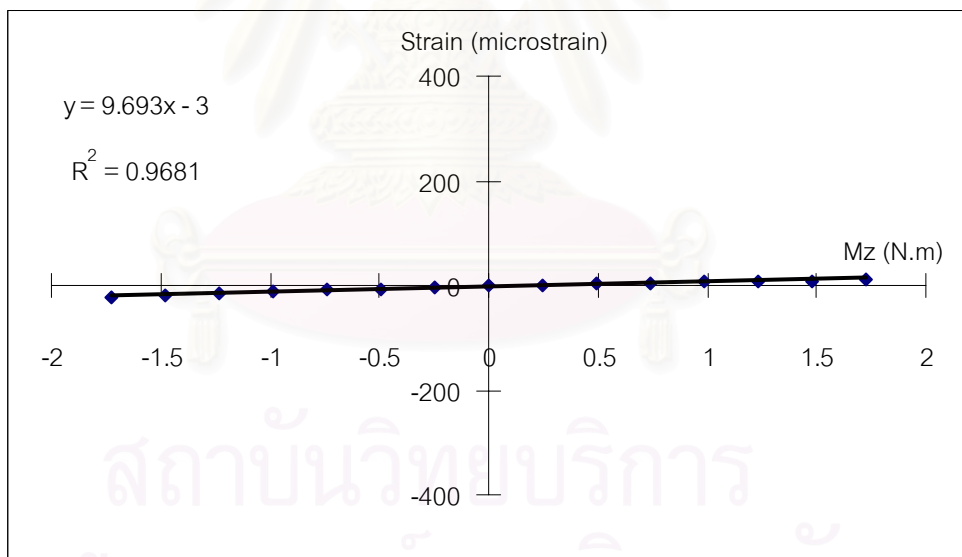
รูปที่ 7.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 1



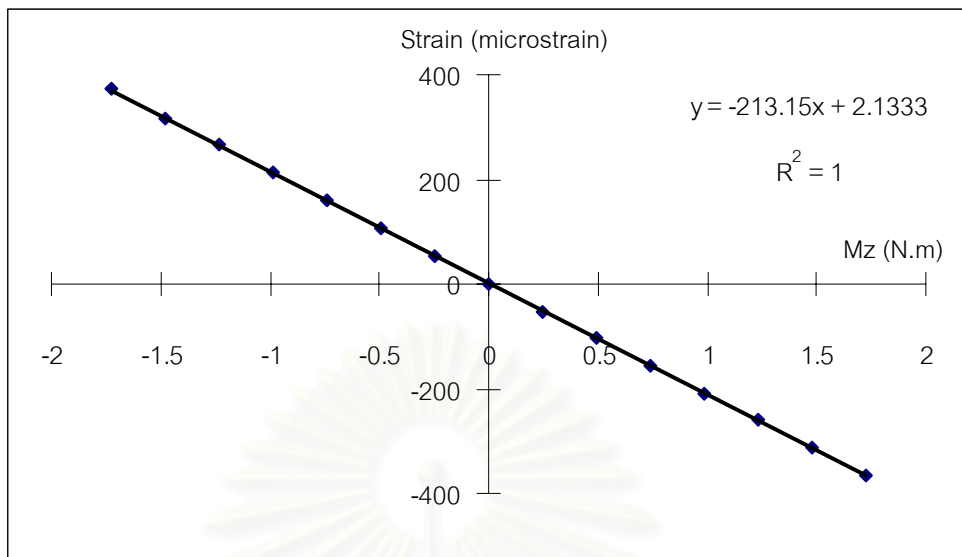
รูปที่ 7.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 2



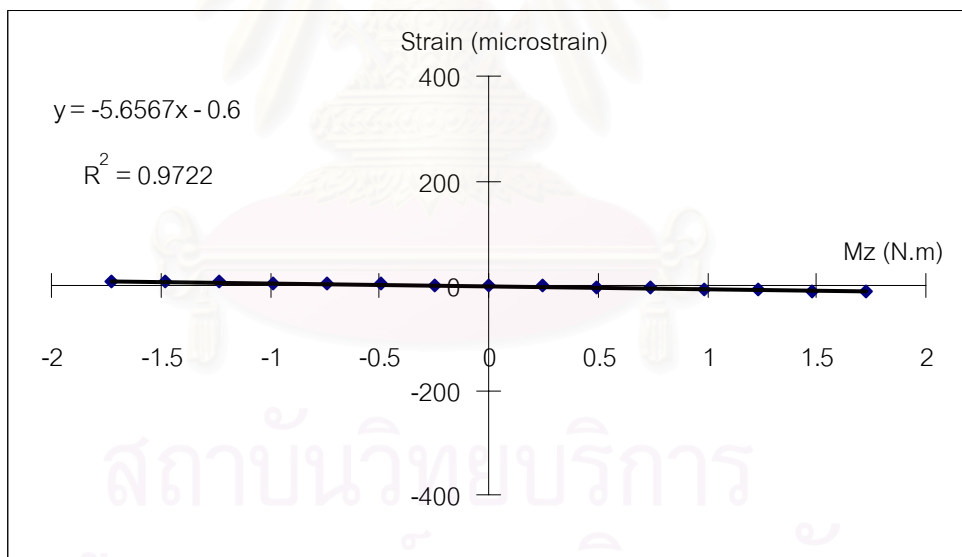
รูปที่ 7.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 3



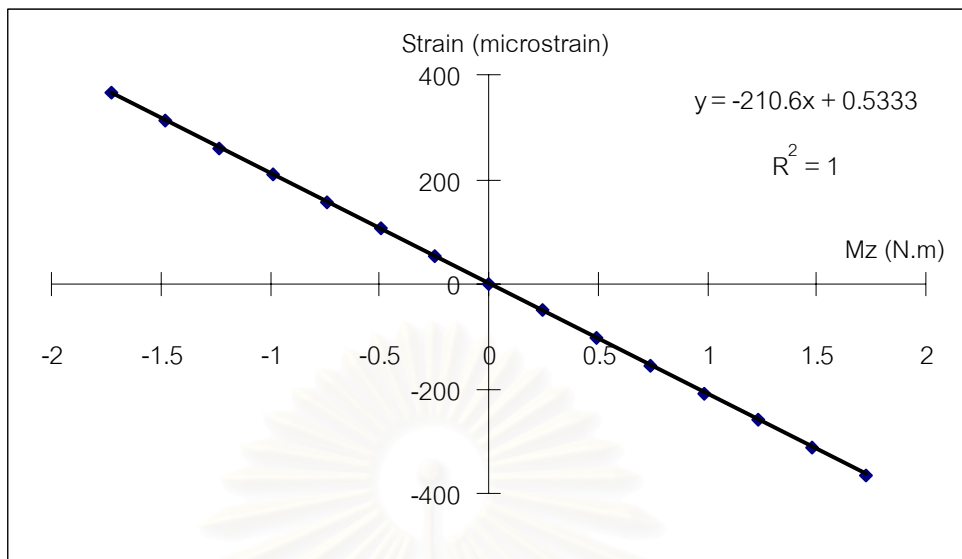
รูปที่ 7.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 4



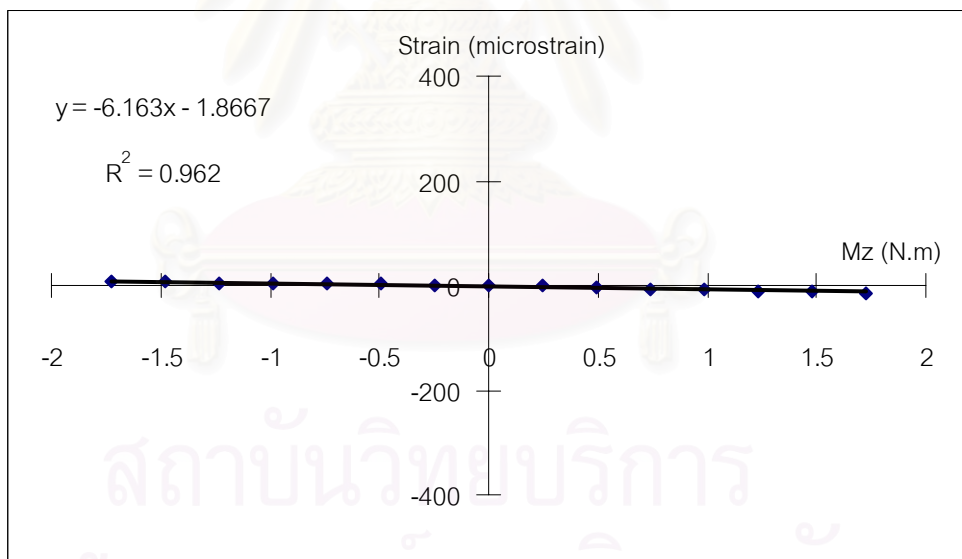
รูปที่ 7.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 5



รูปที่ 7.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ Mz กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 6



รูปที่ 7.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 7



รูปที่ 7.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับค่าความเครียดจากสเตรนเกจชุดที่ 8

จากรูปที่ 7.1–7.48 จะเห็นว่ากราฟส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นที่ดี โดยเฉพาะค่าที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจหลักในการวัดแรงชนิดต่าง ๆ (เช่น รูปที่ 7.3 และ 7.7 เป็นต้น) แต่ก็จะมีบางกราฟที่มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นไม่ดีนัก (เช่น รูปที่ 7.1 และ 7.30 เป็นต้น) โดยจะสังเกตได้จากค่า R^2 [7] ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล โดยค่า R^2 จะมีค่าระหว่าง 0 กับ 1 หากค่า R^2 มีค่าใกล้ 1 มากแสดงว่าตัวแปรอิสระ (ในที่นี้คือ ค่าแรงภายนอก) กับตัวแปรตาม (ในที่นี้คือ ค่าความเครียดที่วัดได้) มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นสูง แต่หากค่า R^2 มีค่าใกล้ 0 แสดงว่าค่าแรงภายนอกกับค่าความเครียดที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นต่ำ โดยสาเหตุที่บางกราฟมีความสัมพันธ์เชิงเส้นไม่ดีนักน่าจะเกิดจากโต๊ะปรับเทียบค่ามีความผิดพลาดเช่น ในการใส่แรง F_x หรือ F_y (ดูจากรูปที่ 6.5) หากเชือกที่ดึงก้อนน้ำหนักไม่อยู่ในแนวระดับจริง จะมีผลทำให้เกิดแรง F_z ขึ้นด้วย ก็จะทำให้ค่าที่วัดมีผลจาก F_z ที่เกิดขึ้นด้วย แต่จะเห็นว่ากราฟที่ผิดปกตินั้นไม่ใช่กราฟจากชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัดแรงที่ศุนั้น ดังนั้นผลที่ได้ก็จะมีส่วนทำให้การวัดแรงและโมเมนต์ผิดพลาดไปไม่มากนัก

โดยจากรูปที่ 7.1–7.48 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่ใส่กับค่าความเครียดที่วัดได้จากชุดสเตรนเกจต่าง ๆ ซึ่งเราจะนำค่าความชันของกราฟแต่ละกราฟมาสร้างเป็นสเตรนคอมไพลแอนซ์เมตริกซ์ได้ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0.0292 & -8.3371 & -0.1086 & -2.3637 & 6.9240 & -214.8200 \\ -0.4695 & 0.0518 & 7.7282 & -3.6938 & -406.7700 & 2.8500 \\ 8.2114 & -0.0860 & 0.0964 & 5.4763 & 1.5738 & -216.2400 \\ -0.3213 & -0.9461 & 8.3051 & 412.0400 & -13.0200 & 9.6930 \\ 0.0116 & 8.3938 & -0.5918 & 1.0185 & -25.5300 & -213.1500 \\ 0.3962 & 0.2259 & 8.9443 & -0.1140 & 405.1300 & -5.6567 \\ -8.1426 & 0.0590 & 0.1466 & -5.5559 & 0.2584 & -210.6000 \\ -0.1857 & 0.9434 & 8.3602 & -404.6000 & -3.1922 & -6.1630 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalization) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.8) จะได้เมตริกซ์ \bar{C}_s ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0.0292 & -8.3371 & -0.1086 & -0.0632 & 0.1852 & -5.7458 \\ -0.4695 & 0.0518 & 7.7282 & -0.0988 & -10.8800 & 0.0762 \\ 8.2114 & -0.0860 & 0.0964 & 0.1465 & 0.0421 & -5.7838 \\ -0.3213 & -0.9461 & 8.3051 & 11.0209 & -0.3482 & 0.2593 \\ 0.0116 & 8.3938 & -0.5918 & 0.0272 & -0.6829 & -5.7012 \\ 0.3962 & 0.2259 & 8.9443 & -0.0030 & 10.8361 & -0.1513 \\ -8.1426 & 0.0590 & 0.1466 & -0.1486 & 0.0069 & -5.6330 \\ -0.1857 & 0.9434 & 8.3602 & -10.8219 & -0.0854 & -0.1648 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ \bar{C}_s ทำการหาค่าซิงกูลาร์วอลูยูี่ได้ดังนี้

$$\sigma_1 = 16.7691 \quad \sigma_2 = 15.5847 \quad \sigma_3 = 15.3499 \quad \sigma_4 = 11.7367 \quad \sigma_5 = 11.5752 \quad \sigma_6 = 11.3793$$

ดังนั้นจะหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของโครงสร้างแบบ Sensor III ได้เท่ากับ $16.7691/11.3793 = 1.4737$

สำหรับโครงสร้างแบบ Sensor II จะใช้สเตรนคอมโพสิทเมตริกซ์ที่ได้ทำการทดลองไว้แล้วในวิทยานิพนธ์ของคุณไพศาล เต็งเจริญชัย [5] ซึ่งมีค่าที่ทดลองได้ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} -0.1335 & 0.6468 & -0.0644 & 4.5342 & 1.6705 & 61.9402 \\ -0.3066 & -0.0618 & 2.2403 & -2.6807 & -202.7100 & 5.9469 \\ 0.5627 & -0.1347 & 0.0865 & 3.5266 & -5.3667 & -57.5450 \\ -0.0994 & 0.0973 & -2.2304 & -193.5600 & -3.3330 & -6.0136 \\ 0.0654 & -0.4860 & -0.0468 & -6.2311 & -3.6326 & 65.7890 \\ 0.3469 & -0.0753 & 2.3438 & -1.7765 & 177.9200 & -3.7291 \\ -0.5892 & 0.1902 & 0.1107 & -2.8637 & 4.7595 & -67.3200 \\ -0.0346 & -0.2566 & -2.1442 & 191.0400 & 3.0758 & -6.7908 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการนอมลไลซ์ (normalization) ตามสมการที่ (3.6) และ (3.8) จะได้เมตริกซ์ \bar{C}_s ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} -0.1335 & 0.6468 & -0.0644 & 0.0501 & 0.0185 & 0.6842 \\ -0.3066 & -0.0618 & 2.2403 & -0.0296 & -2.2392 & 0.0657 \\ 0.5627 & -0.1347 & 0.0865 & 0.0390 & -0.0593 & -0.6357 \\ -0.0994 & 0.0973 & -2.2304 & -2.1382 & -0.0368 & -0.0664 \\ 0.0654 & -0.4860 & -0.0468 & -0.0688 & -0.0401 & 0.7267 \\ 0.3469 & -0.0753 & 2.3438 & -0.0196 & 1.9654 & -0.0412 \\ -0.5892 & 0.1902 & 0.1107 & -0.0316 & 0.0526 & -0.7436 \\ -0.0346 & -0.2566 & -2.1442 & 2.1103 & 0.0340 & -0.0750 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ \bar{C}_s ทำการหาค่าซิงกูลาร์วอลูยูี่ได้ดังนี้

$$\sigma_1 = 4.4872 \quad \sigma_2 = 3.0501 \quad \sigma_3 = 2.9808 \quad \sigma_4 = 1.4010 \quad \sigma_5 = 1.0078 \quad \sigma_6 = 0.6384$$

ดังนั้นจะหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของโครงสร้างแบบ Sensor II ได้เท่ากับ $4.4872/0.6384 = 7.0287$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของโครงสร้างแบบ Sensor III มีค่าใกล้ 1 มากกว่าโครงสร้างแบบ Sensor II ซึ่งก็หมายถึง โครงสร้างแบบ Sensor III มีประสิทธิภาพดีกว่าโครงสร้างแบบ Sensor II นั่นเอง

นอกจากนี้หากพิจารณาความไว (Sensitivity) ของ Sensor III จะพบว่ามีความมากกว่า Sensor II ดังนี้

- ค่าความไวในการวัดแรง Fx ของ Sensor III มีค่า 8.177 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน ในขณะที่ Sensor II มีค่า 0.576 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน
- ค่าความไวในการวัดแรง Fy ของ Sensor III มีค่า 8.365 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน ในขณะที่ Sensor II มีค่า 0.567 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน
- ค่าความไวในการวัดแรง Fz ของ Sensor III มีค่า 8.334 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน ในขณะที่ Sensor II มีค่า 2.240 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน
- ค่าความไวในการวัดโมเมนต์ Mx ของ Sensor III มีค่า 408.320 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร ในขณะที่ Sensor II มีค่า 192.300 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร
- ค่าความไวในการวัดโมเมนต์ My ของ Sensor III มีค่า 405.950 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร ในขณะที่ Sensor II มีค่า 190.315 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร
- ค่าความไวในการวัดโมเมนต์ Mz ของ Sensor III มีค่า 213.703 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร ในขณะที่ Sensor II มีค่า 63.149 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร

และจากสเตรนคอมไพลเอ็นซ์เมตริกซ์ (C_s) ของโครงสร้างแบบ Sensor III จะสามารถนำไปหาเซนเซอร์คาลิเบชันเมตริกซ์ (C_s^+) ได้ตามสมการที่ (3.3) ดังนั้นเซนเซอร์คาลิเบชันเมตริกซ์ของโครงสร้างแบบ Sensor III ที่คำนวณได้จะมีค่าดังนี้

$$C_s^+ = \begin{bmatrix} -0.0009 & 0.0010 & 0.0608 & -0.0015 & 0.0000 & 0.0008 & -0.0615 & 0.0001 \\ -0.0595 & -0.0011 & -0.0001 & 0.0001 & 0.0599 & 0.0037 & 0.0000 & 0.0006 \\ -0.0003 & 0.0293 & 0.0019 & 0.0298 & -0.0013 & 0.0306 & -0.0002 & 0.0301 \\ -0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0012 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0012 \\ 0.0000 & -0.0013 & -0.0001 & -0.0001 & 0.0000 & 0.0012 & 0.0001 & -0.0001 \\ -0.0012 & 0.0000 & -0.0012 & 0.0000 & -0.0012 & 0.0000 & -0.0012 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ C_s^+ ที่ได้ข้างต้นและค่าความเครียดที่วัดได้ตามชุดสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด ก็จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าแรงและโมเมนต์ภายนอกที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงได้ตามสมการที่ (3.2) นั่นเอง

7.2 การทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านสถิติของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง Sensor III

7.2.1 การหาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของ Sensor III

1. การทดลองเพื่อหาค่าความถูกต้องเมื่อใช้วัดแรง F_x และโมเมนต์ M_y โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ดังรูปที่ 6.10 ซึ่งถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแกน x บวก จะทำให้เกิดแรง F_x บวกและโมเมนต์ M_y ลบ ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแกน x ลบ จะทำให้เกิดแรง F_x ลบและโมเมนต์ M_y บวก ผลการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 7.7-7.12 และรูปที่ 7.49-7.52

ตารางที่ 7.7 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านลบ

ค่าโหลดที่ใส่			ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	F_x (N)	M_y (N.m)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8
0.0	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	-2.224	0.322	0	-129	-18	-3	-8	128	18	0
1.0	-4.448	0.645	2	-260	-36	-6	-17	259	37	0
1.5	-6.672	0.967	3	-390	-53	-10	-26	388	55	-1
2.0	-8.896	1.290	5	-521	-71	-13	-35	520	74	-2
2.5	-11.120	1.612	6	-650	-89	-16	-43	648	93	-2
3.0	-13.344	1.935	8	-778	-106	-19	-52	776	111	-3
3.5	-15.568	2.257	9	-907	-124	-20	-61	905	129	-5
3.0	-13.344	1.935	8	-782	-107	-18	-52	780	112	-4
2.5	-11.120	1.612	6	-654	-90	-15	-44	653	93	-4
2.0	-8.896	1.290	5	-526	-72	-12	-35	524	75	-3
1.5	-6.672	0.967	3	-396	-54	-9	-26	394	57	-2
1.0	-4.448	0.645	2	-266	-36	-6	-17	263	38	-1
0.5	-2.224	0.322	0	-134	-18	-3	-8	132	19	0
0.0	0.000	0.000	0	-3	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 7.8 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านลบ

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fx (N)	My (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	-2.224	0.322	-2.226	0.137	0.012	0.000	0.319	0.003
1.0	-4.448	0.645	-4.515	0.109	0.058	0.000	0.644	0.003
1.5	-6.672	0.967	-6.680	0.131	0.014	0.000	0.965	0.005
2.0	-8.896	1.290	-8.968	0.105	0.060	0.001	1.292	0.005
2.5	-11.120	1.612	-11.257	0.183	0.072	0.001	1.611	0.006
3.0	-13.344	1.935	-13.423	0.139	0.086	0.002	1.928	0.006
3.5	-15.568	2.257	-15.652	0.160	0.129	0.006	2.249	0.009
3.0	-13.344	1.935	-13.548	0.158	0.088	0.004	1.938	0.006
2.5	-11.120	1.612	-11.319	0.145	0.076	0.004	1.622	0.008
2.0	-8.896	1.290	-9.094	0.125	0.033	0.003	1.303	0.005
1.5	-6.672	0.967	-6.867	0.159	0.019	0.002	0.980	0.003
1.0	-4.448	0.645	-4.580	0.130	-0.026	0.001	0.657	0.002
0.5	-2.224	0.322	-2.289	0.158	-0.013	0.000	0.330	0.002
0.0	0.000	0.000	-0.003	0.003	-0.088	0.000	0.004	0.000

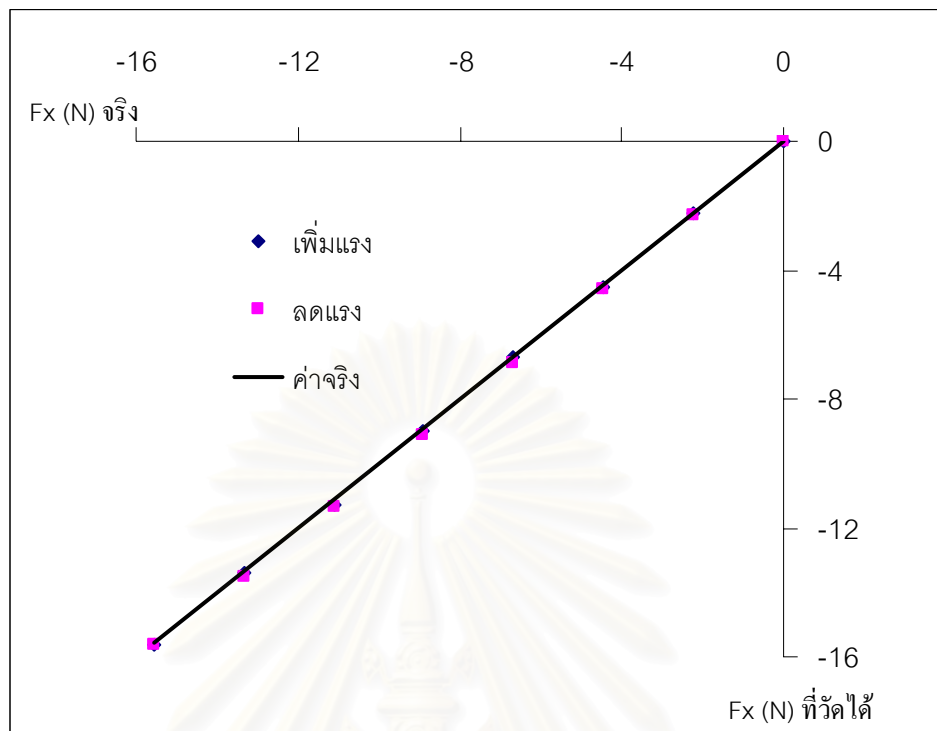
ผลจากตารางที่ 7.8 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.7 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fx ลบและโมเมนต์ My บวกที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.9 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0 มาก

ตารางที่ 7.9 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fx ลบและโมเมนต์ My บวก

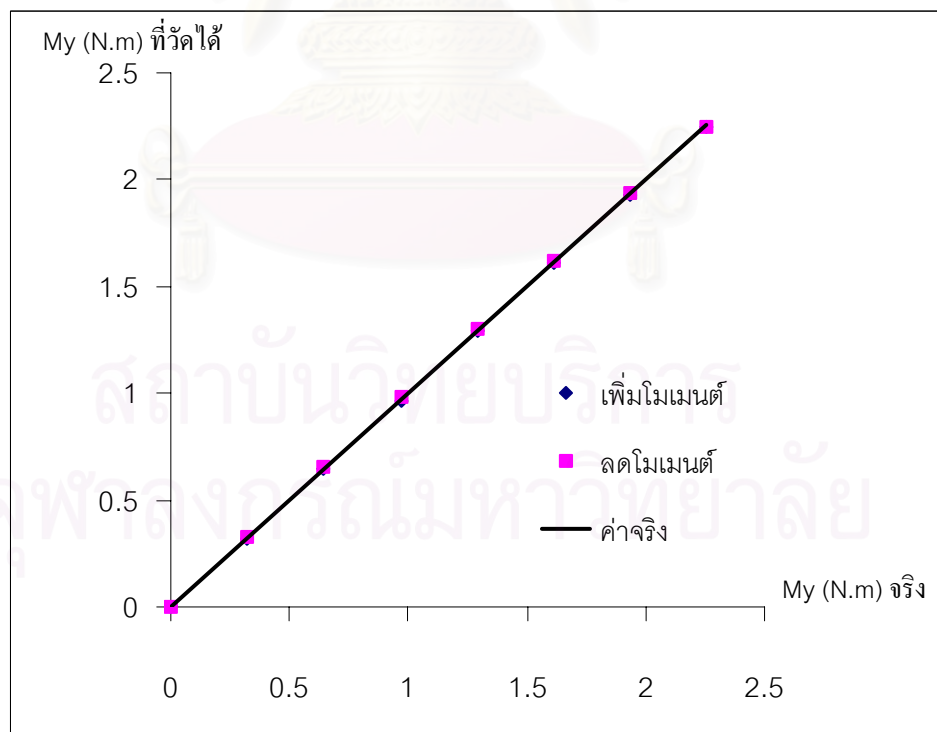
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงหลักที่วัดได้		ความผิดพลาดของแรง Fx			ความผิดพลาดโมเมนต์ My		
นน. (lb)	Fx (N)	My (N.m)	Fx (N)	My(N.m)	(N)	%reading	%full scale	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.00%	0.000	-	0.00%
0.5	-2.224	0.322	-2.226	0.319	-0.002	0.09%	0.01%	-0.004	-1.11%	-0.16%
1.0	-4.448	0.645	-4.515	0.644	-0.067	1.51%	0.43%	-0.001	-0.15%	-0.04%
1.5	-6.672	0.967	-6.680	0.965	-0.008	0.12%	0.05%	-0.002	-0.21%	-0.09%
2.0	-8.896	1.290	-8.968	1.292	-0.072	0.81%	0.46%	0.002	0.15%	0.08%
2.5	-11.120	1.612	-11.257	1.611	-0.137	1.23%	0.88%	-0.002	-0.11%	-0.08%
3.0	-13.344	1.935	-13.423	1.928	-0.079	0.59%	0.51%	-0.006	-0.33%	-0.29%
3.5	-15.568	2.257	-15.652	2.249	-0.084	0.54%	0.54%	-0.009	-0.39%	-0.39%
3.0	-13.344	1.935	-13.548	1.938	-0.204	1.53%	1.31%	0.003	0.18%	0.15%
2.5	-11.120	1.612	-11.319	1.622	-0.199	1.79%	1.28%	0.009	0.59%	0.42%
2.0	-8.896	1.290	-9.094	1.303	-0.198	2.23%	1.27%	0.013	1.01%	0.58%
1.5	-6.672	0.967	-6.867	0.980	-0.195	2.92%	1.25%	0.013	1.34%	0.57%
1.0	-4.448	0.645	-4.580	0.657	-0.132	2.96%	0.84%	0.012	1.79%	0.51%
0.5	-2.224	0.322	-2.289	0.330	-0.065	2.94%	0.42%	0.008	2.36%	0.34%
0.0	0.000	0.000	-0.003	0.004	-0.003	-	0.02%	0.004	-	0.17%

ตารางที่ 7.9 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fx ลบและ My บวก จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fx ลบจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 1.31 %ฟูลสเกล ที่แรง -13.344 นิวตัน โดยแรง Fx ฟูลสเกลลบมีค่าเท่ากับ -15.568 นิวตัน ส่วนค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ My บวกจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.58 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ 0.967 นิวตันเมตร โดยค่าฟูลสเกลของ My บวกมีค่าเท่ากับ 2.257 นิวตันเมตร และจะเห็นว่า การวัดในช่วงของการเพิ่มน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงของการลดน้ำหนักทั้งในส่วนของการวัดแรง Fx ลบและ My บวก ซึ่งอาจจะเกิดจากการมีฮิสเทอรีซิสอยู่บ้างเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.9 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.49 และ 7.50 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ทั้งการวัดแรง Fx ลบ และโมเมนต์ My บวก



รูปที่ 7.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ F_x ลบ



รูปที่ 7.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ M_y บวก

ตารางที่ 7.10 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านบวก

ค่าโหลดที่ใส่			ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	Fx (N)	My (N.m)	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8
0.0	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	2.224	-0.322	-2	127	17	1	8	-129	-19	0
1.0	4.448	-0.645	-4	256	35	4	17	-258	-38	2
1.5	6.672	-0.967	-7	388	53	7	25	-389	-56	4
2.0	8.896	-1.290	-9	519	71	11	34	-520	-75	5
2.5	11.120	-1.612	-11	650	88	14	43	-651	-93	7
3.0	13.344	-1.935	-13	783	106	18	51	-784	-112	9
3.5	15.568	-2.257	-16	911	124	21	60	-912	-131	10
3.0	13.344	-1.935	-14	786	107	18	51	-785	-112	9
2.5	11.120	-1.612	-12	655	89	15	43	-656	-95	6
2.0	8.896	-1.290	-9	526	72	12	34	-527	-77	4
1.5	6.672	-0.967	-7	395	54	8	26	-397	-58	2
1.0	4.448	-0.645	-5	262	36	5	17	-265	-39	1
0.5	2.224	-0.322	-3	129	18	2	8	-132	-20	0
0.0	0.000	0.000	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.11 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ด้านบวก

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fx (N)	My (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	2.224	-0.322	2.229	-0.020	-0.162	-0.002	-0.317	0.002
1.0	4.448	-0.645	4.518	0.020	-0.145	-0.005	-0.638	0.002
1.5	6.672	-0.967	6.747	0.048	-0.100	-0.007	-0.964	0.002
2.0	8.896	-1.290	9.035	0.077	-0.085	-0.007	-1.289	0.002
2.5	11.120	-1.612	11.202	0.107	-0.073	-0.009	-1.614	0.002
3.0	13.344	-1.935	13.490	0.067	-0.030	-0.010	-1.945	0.003
3.5	15.568	-2.257	15.779	0.170	-0.041	-0.011	-2.262	0.003
3.0	13.344	-1.935	13.554	0.119	0.030	-0.010	-1.950	0.003
2.5	11.120	-1.612	11.386	0.142	-0.077	-0.006	-1.627	0.004
2.0	8.896	-1.290	9.219	0.043	-0.092	-0.004	-1.307	0.004
1.5	6.672	-0.967	6.930	0.069	-0.168	-0.003	-0.983	0.003
1.0	4.448	-0.645	4.640	0.046	-0.181	-0.002	-0.654	0.003
0.5	2.224	-0.322	2.350	0.027	-0.163	-0.001	-0.324	0.003
0.0	0.000	0.000	0.061	0.056	-0.090	0.001	0.000	0.002

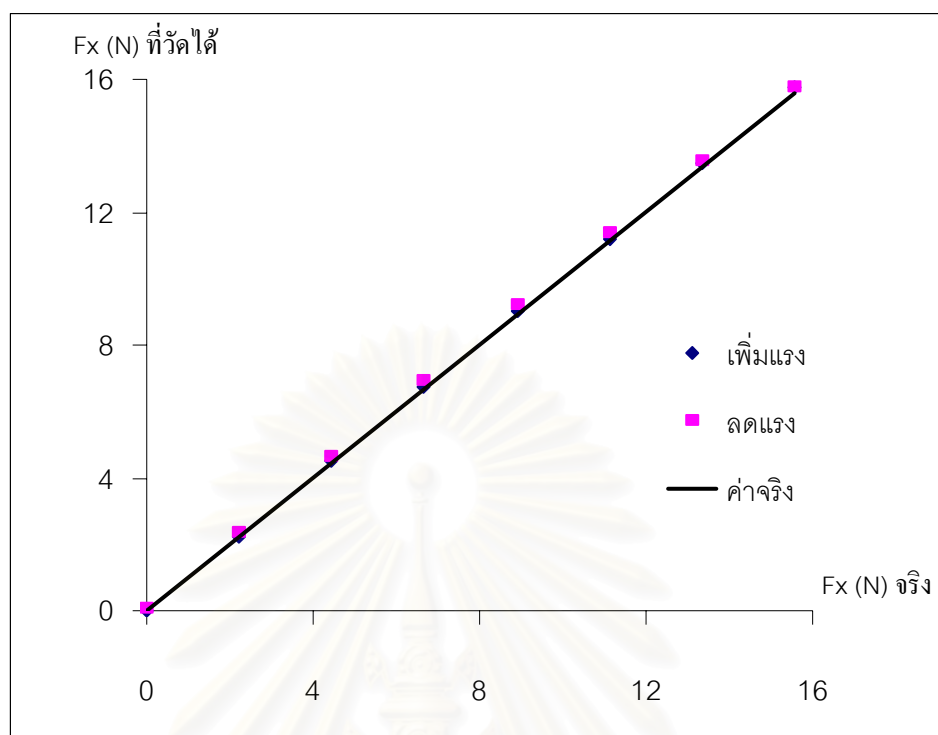
โดยผลจากตารางที่ 7.11 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.10 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fx บวกและโมเมนต์ My ลบที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.12 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0 มาก

ตารางที่ 7.12 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fx บวกและโมเมนต์ My ลบ

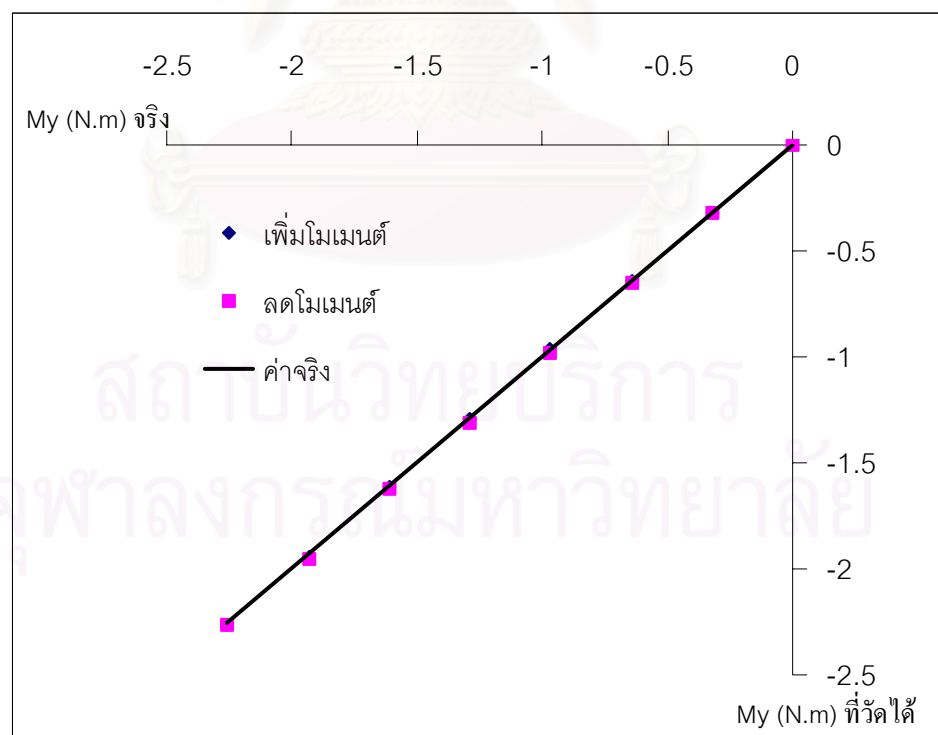
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงหลักที่วัดได้		ความผิดพลาดของแรง Fx			ความผิดพลาดโมเมนต์ My		
นน. (lb)	Fx (N)	My (N.m)	Fx (N)	My(N.m)	(N)	%reading	%full scale	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.00%	0.000	-	0.00%
0.5	2.224	-0.322	2.229	-0.317	0.005	0.22%	0.03%	0.005	-1.58%	-0.23%
1.0	4.448	-0.645	4.518	-0.638	0.070	1.56%	0.45%	0.007	-1.13%	-0.32%
1.5	6.672	-0.967	6.747	-0.964	0.075	1.13%	0.48%	0.003	-0.36%	-0.15%
2.0	8.896	-1.290	9.035	-1.289	0.139	1.56%	0.89%	0.001	-0.05%	-0.03%
2.5	11.120	-1.612	11.202	-1.614	0.082	0.74%	0.53%	-0.002	0.12%	0.08%
3.0	13.344	-1.935	13.490	-1.945	0.146	1.09%	0.94%	-0.010	0.50%	0.43%
3.5	15.568	-2.257	15.779	-2.262	0.211	1.36%	1.36%	-0.005	0.21%	0.21%
3.0	13.344	-1.935	13.554	-1.950	0.210	1.57%	1.35%	-0.015	0.76%	0.65%
2.5	11.120	-1.612	11.386	-1.627	0.266	2.39%	1.71%	-0.014	0.89%	0.64%
2.0	8.896	-1.290	9.219	-1.307	0.323	3.63%	2.07%	-0.017	1.30%	0.74%
1.5	6.672	-0.967	6.930	-0.983	0.258	3.87%	1.66%	-0.015	1.58%	0.68%
1.0	4.448	-0.645	4.640	-0.654	0.192	4.31%	1.23%	-0.009	1.37%	0.39%
0.5	2.224	-0.322	2.350	-0.324	0.126	5.67%	0.81%	-0.001	0.38%	0.05%
0.0	0.000	0.000	0.061	0.000	0.061	-	0.39%	0.000	-	0.00%

ตารางที่ 7.12 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fx บวกและ My ลบ จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fx บวกจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 2.07 %ฟูลสเกล ที่แรง 8.896 นิวตัน โดยแรง Fx ฟูลสเกลบวกมีค่า 15.568 นิวตัน ส่วนค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ My บวกจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.74 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ -1.290 นิวตันเมตร โดยค่าฟูลสเกลของ My ลบมีค่า -2.257 นิวตันเมตร และจะเห็นว่า การวัดในช่วงของการเพิ่มน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงของการลดน้ำหนักทั้งในส่วนของการวัดแรง Fx บวกและ My ลบ ซึ่งอาจเกิดจากการมีฮิสเทอรีซิสอยู่บ้างเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.12 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.51 และ 7.52 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ทั้งการวัดแรง Fx บวก และโมเมนต์ My ลบ



รูปที่ 7.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ F_x บวก



รูปที่ 7.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ M_y ลบ

2. . การทดลองเพื่อหาค่าความถูกต้องเมื่อใช้วัดแรง F_y และโมเมนต์ M_x โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ดังรูปที่ 6.10 ซึ่งถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแกน y ลง จะทำให้เกิดแรง F_y ลงและโมเมนต์ M_x ลง ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแกน y บวก จะทำให้เกิดแรง F_y บวกและโมเมนต์ M_y บวก ผลการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 7.13-7.18

ตารางที่ 7.13 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านลบ

ค่าโหลดที่ใส่			ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	F_y (N)	M_x (N.m)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8
0.0	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	-2.224	-0.322	18	1	-1	-130	-20	0	0	128
1.0	-4.448	-0.645	37	2	-3	-259	-40	0	2	257
1.5	-6.672	-0.967	56	4	-5	-390	-59	-1	3	387
2.0	-8.896	-1.290	74	5	-6	-522	-78	-1	4	517
2.5	-11.120	-1.612	93	6	-8	-655	-98	-1	5	649
3.0	-13.344	-1.935	112	8	-9	-785	-117	-1	7	780
3.5	-15.568	-2.257	130	9	-11	-915	-137	-1	8	908
3.0	-13.344	-1.935	112	9	-9	-787	-118	0	7	781
2.5	-11.120	-1.612	94	8	-8	-659	-99	0	5	654
2.0	-8.896	-1.290	76	6	-6	-528	-79	0	4	525
1.5	-6.672	-0.967	57	5	-5	-394	-60	0	3	393
1.0	-4.448	-0.645	38	4	-3	-263	-40	0	2	263
0.5	-2.224	-0.322	19	2	-1	-132	-20	0	0	132
0.0	0.000	0.000	0	1	0	-1	0	0	0	3

ตารางที่ 7.14 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านลบ

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fy (N)	Mx (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	-2.224	-0.322	0.137	-2.205	0.027	-0.321	0.001	0.004
1.0	-4.448	-0.645	0.089	-4.469	0.111	-0.642	0.001	0.006
1.5	-6.672	-0.967	0.105	-6.677	0.163	-0.967	-0.001	0.007
2.0	-8.896	-1.290	0.184	-8.821	0.189	-1.293	0.000	0.009
2.5	-11.120	-1.612	0.203	-11.083	0.244	-1.623	0.000	0.012
3.0	-13.344	-1.935	0.218	-13.287	0.388	-1.947	0.000	0.011
3.5	-15.568	-2.257	0.233	-15.492	0.413	-2.268	0.000	0.015
3.0	-13.344	-1.935	0.223	-13.344	0.420	-1.951	0.000	0.012
2.5	-11.120	-1.612	0.212	-11.199	0.366	-1.634	-0.001	0.012
2.0	-8.896	-1.290	0.194	-8.993	0.311	-1.310	0.000	0.008
1.5	-6.672	-0.967	0.112	-6.791	0.285	-0.980	-0.001	0.007
1.0	-4.448	-0.645	0.097	-4.527	0.231	-0.655	-0.002	0.004
0.5	-2.224	-0.322	0.141	-2.264	0.117	-0.329	-0.001	0.003
0.0	0.000	0.000	0.003	0.001	0.090	-0.005	-0.001	0.000

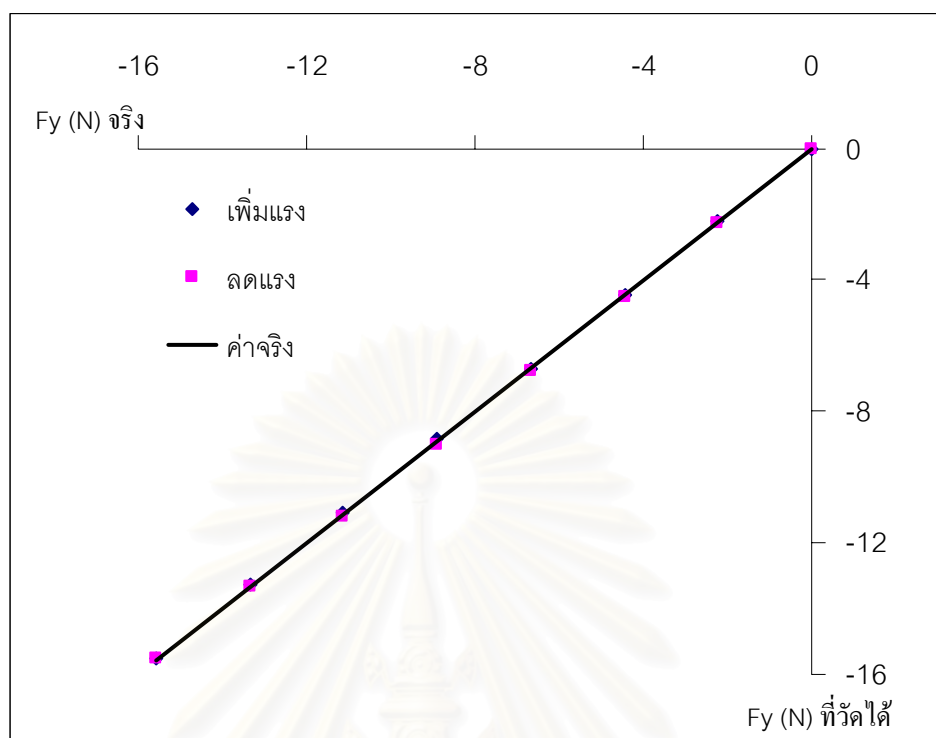
โดยผลจากตารางที่ 7.14 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.13 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fy ลบและโมเมนต์ Mx ลบที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.15 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0

ตารางที่ 7.15 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fy ลบและโมเมนต์ Mx ลบ

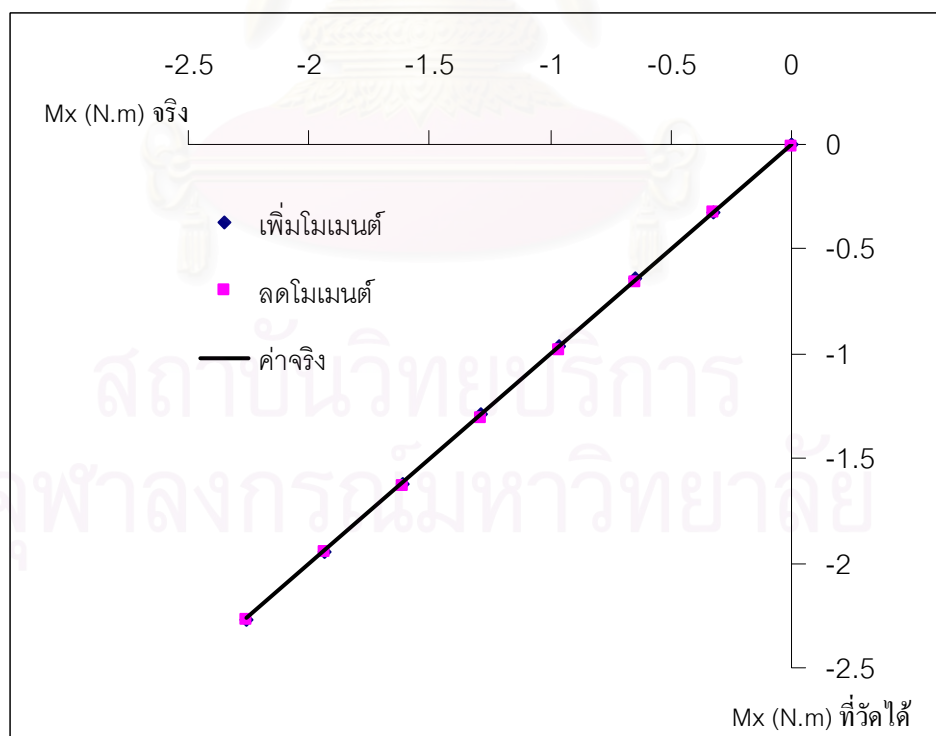
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงหลักที่วัดได้		ความผิดพลาดของแรง Fy			ความผิดพลาดโมเมนต์ Mx		
นน. (lb)	Fy (N)	Mx (N.m)	Fy (N)	Mx (N.m)	(N)	%reading	%full scale	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.00%	0.000	-	0.00%
0.5	-2.224	-0.322	-2.205	-0.321	0.019	-0.85%	-0.12%	0.001	-0.43%	-0.06%
1.0	-4.448	-0.645	-4.469	-0.642	-0.021	0.47%	0.13%	0.003	-0.43%	-0.12%
1.5	-6.672	-0.967	-6.677	-0.967	-0.005	0.07%	0.03%	0.000	-0.05%	-0.02%
2.0	-8.896	-1.290	-8.821	-1.293	0.075	-0.84%	-0.48%	-0.003	0.22%	0.13%
2.5	-11.120	-1.612	-11.083	-1.623	0.037	-0.33%	-0.24%	-0.010	0.63%	0.45%
3.0	-13.344	-1.935	-13.287	-1.947	0.057	-0.42%	-0.36%	-0.012	0.64%	0.55%
3.5	-15.568	-2.257	-15.492	-2.268	0.076	-0.49%	-0.49%	-0.011	0.48%	0.48%
3.0	-13.344	-1.935	-13.344	-1.951	0.000	0.00%	0.00%	-0.016	0.84%	0.72%
2.5	-11.120	-1.612	-11.199	-1.634	-0.079	0.71%	0.51%	-0.021	1.33%	0.95%
2.0	-8.896	-1.290	-8.993	-1.310	-0.097	1.09%	0.62%	-0.020	1.58%	0.90%
1.5	-6.672	-0.967	-6.791	-0.980	-0.119	1.78%	0.76%	-0.012	1.25%	0.53%
1.0	-4.448	-0.645	-4.527	-0.655	-0.079	1.79%	0.51%	-0.010	1.49%	0.43%
0.5	-2.224	-0.322	-2.264	-0.329	-0.039	1.78%	0.25%	-0.006	1.87%	0.27%
0.0	0.000	0.000	0.001	-0.005	0.001	-	0.00%	-0.005	-	0.22%

ตารางที่ 7.15 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fy ลบและ Mx ลบ จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fy ลบจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.76 %ฟูลสเกล ที่แรง -6.672 นิวตัน โดยแรง Fy ฟูลสเกลลบมีค่า -15.568 นิวตัน ส่วนค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mx ลบ จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.95 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ -1.612 นิวตันเมตร โดยค่าฟูลสเกลของ Mx ลบ มีค่า -2.257 นิวตันเมตร และจะเห็นว่า การวัดในช่วงของการเพิ่มน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงของการลดน้ำหนักทั้งในส่วนของการวัดแรง Fy ลบและ Mx ลบ ซึ่งอาจจะเกิดจากการมีฮิสเทอรีซิสอยู่บ้างเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.15 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.53 และ 7.54 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ทั้งการวัดแรง Fy ลบ และโมเมนต์ Mx ลบ



รูปที่ 7.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ F_y ลบ



รูปที่ 7.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ M_x ลบ

ตารางที่ 7.16 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจจุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านบวก

ค่าโหลดที่ใส่			ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	Fy (N)	Mx (N.m)	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8
0.0	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	2.224	0.322	-18	0	2	128	19	0	-1	-126
1.0	4.448	0.645	-37	1	4	259	39	-1	-3	-255
1.5	6.672	0.967	-56	1	6	391	59	-2	-5	-384
2.0	8.896	1.290	-75	1	8	526	79	-2	-7	-518
2.5	11.120	1.612	-94	2	10	660	98	-3	-9	-650
3.0	13.344	1.935	-113	3	12	790	117	-3	-11	-779
3.5	15.568	2.257	-133	3	14	919	137	-3	-13	-907
3.0	13.344	1.935	-115	3	12	794	118	-3	-11	-783
2.5	11.120	1.612	-96	2	10	665	99	-2	-9	-654
2.0	8.896	1.290	-77	2	8	533	79	-1	-7	-523
1.5	6.672	0.967	-58	1	6	401	60	0	-5	-392
1.0	4.448	0.645	-39	1	4	268	40	0	-3	-261
0.5	2.224	0.322	-20	1	2	134	20	1	-1	-129
0.0	0.000	0.000	-1	1	0	3	0	1	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.17 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ด้านบวก

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fy (N)	Mx (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	2.224	0.322	-0.011	2.145	0.007	0.316	-0.002	-0.003
1.0	4.448	0.645	0.036	4.403	0.010	0.640	-0.006	-0.004
1.5	6.672	0.967	0.081	6.662	0.014	0.964	-0.010	-0.006
2.0	8.896	1.290	0.121	8.922	-0.012	1.299	-0.012	-0.008
2.5	11.120	1.612	0.163	11.119	-0.008	1.630	-0.016	-0.008
3.0	13.344	1.935	0.212	13.320	-0.002	1.952	-0.019	-0.008
3.5	15.568	2.257	0.263	15.643	-0.027	2.272	-0.021	-0.009
3.0	13.344	1.935	0.207	13.497	-0.004	1.962	-0.019	-0.007
2.5	11.120	1.612	0.157	11.299	0.051	1.641	-0.015	-0.007
2.0	8.896	1.290	0.113	9.041	0.107	1.314	-0.012	-0.005
1.5	6.672	0.967	0.068	6.844	0.132	0.987	-0.007	-0.005
1.0	4.448	0.645	0.024	4.583	0.128	0.658	-0.005	-0.003
0.5	2.224	0.322	-0.017	2.325	0.154	0.327	-0.002	-0.002
0.0	0.000	0.000	-0.002	0.062	0.150	0.004	0.000	0.001

โดยผลจากตารางที่ 7.17 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.16 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fy บวกและโมเมนต์ Mx บวกที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.18 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0

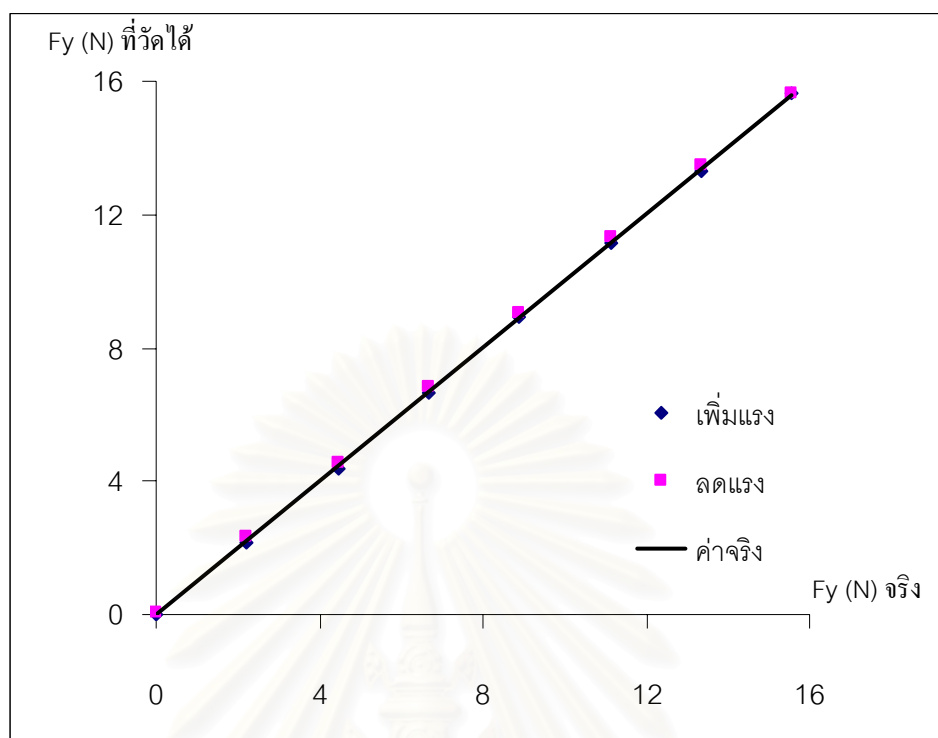
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.18 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fy บวกและโมเมนต์ Mx บวก

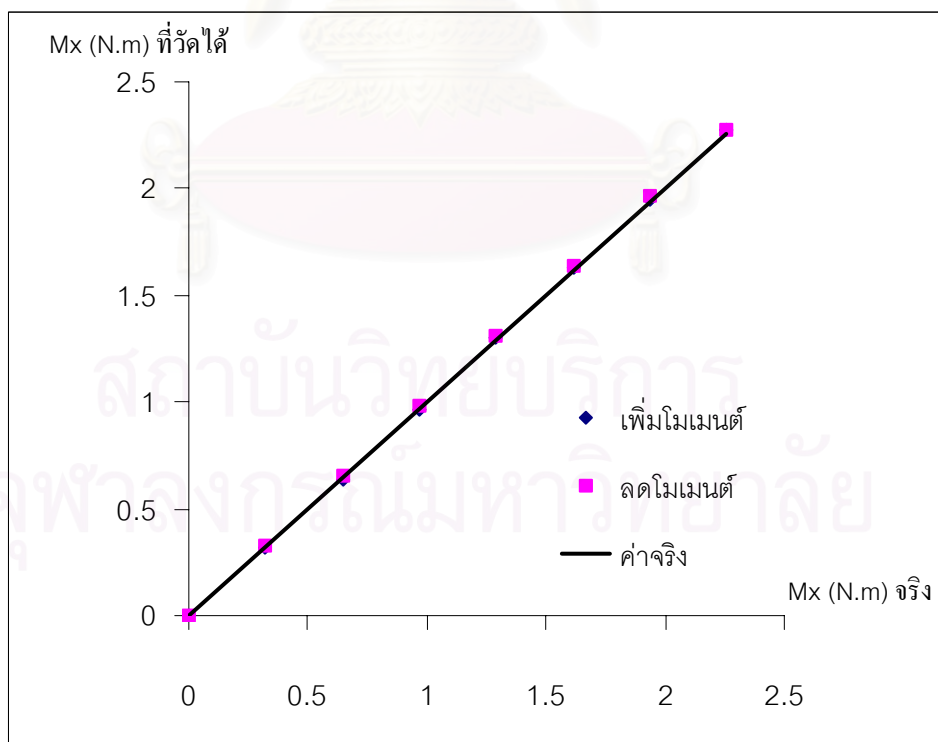
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง			ค่าแรงหลักที่วัดได้		ความผิดพลาดของแรง Fy			ความผิดพลาดโมเมนต์ Mx		
นน. (lb)	Fy (N)	Mx (N.m)	Fy (N)	Mx (N.m)	(N)	%reading	%full scale	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.00%	0.000	-	0.00%
0.5	2.224	0.322	2.145	0.316	-0.079	-3.56%	-0.51%	-0.006	-2.01%	-0.29%
1.0	4.448	0.645	4.403	0.640	-0.045	-1.02%	-0.29%	-0.005	-0.83%	-0.24%
1.5	6.672	0.967	6.662	0.964	-0.010	-0.15%	-0.06%	-0.003	-0.31%	-0.13%
2.0	8.896	1.290	8.922	1.299	0.026	0.29%	0.17%	0.009	0.70%	0.40%
2.5	11.120	1.612	11.119	1.630	-0.001	-0.01%	-0.01%	0.017	1.08%	0.77%
3.0	13.344	1.935	13.320	1.952	-0.024	-0.18%	-0.15%	0.017	0.88%	0.76%
3.5	15.568	2.257	15.643	2.272	0.075	0.48%	0.48%	0.015	0.65%	0.65%
3.0	13.344	1.935	13.497	1.962	0.153	1.15%	0.98%	0.027	1.41%	1.21%
2.5	11.120	1.612	11.299	1.641	0.179	1.61%	1.15%	0.029	1.79%	1.28%
2.0	8.896	1.290	9.041	1.314	0.145	1.63%	0.93%	0.024	1.87%	1.07%
1.5	6.672	0.967	6.844	0.987	0.172	2.58%	1.11%	0.019	2.01%	0.86%
1.0	4.448	0.645	4.583	0.658	0.134	3.02%	0.86%	0.013	2.08%	0.60%
0.5	2.224	0.322	2.325	0.327	0.101	4.54%	0.65%	0.005	1.53%	0.22%
0.0	0.000	0.000	0.062	0.004	0.062	-	0.40%	0.004	-	0.17%

ตารางที่ 7.18 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fy บวกและ Mx บวก จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fy บวกจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 1.15 %ฟูลสเกล ที่แรง 11.120 นิวตัน โดยแรง Fy ฟูลสเกลบวกมีค่า 15.568 นิวตัน ส่วนค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mx บวกจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.28 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ 1.612 นิวตันเมตร โดยค่าฟูลสเกลของ Mx บวกมีค่า 2.257 นิวตันเมตร และจะเห็นว่า การวัดในช่วงของการเพิ่มน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงของการลดน้ำหนักทั้งในส่วนของการวัดแรง Fy บวกและ Mx บวก ซึ่งอาจเกิดจากการมีฮิสเทอรีซิสอยู่บ้างเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.18 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.55 และ 7.56 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ทั้งการวัดแรง Fy บวก และโมเมนต์ Mx บวก



รูปที่ 7.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ F_y บวก



รูปที่ 7.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ M_x บวก

ตารางที่ 7.20 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านลบ

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fz (N)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	-2.224	-0.007	0.064	-2.159	0.000	0.003	-0.001
1.0	-4.448	-0.013	0.059	-4.378	-0.001	0.003	-0.001
1.5	-6.672	-0.020	0.054	-6.656	-0.002	0.004	-0.001
2.0	-8.896	0.036	0.049	-8.905	-0.002	0.004	0.000
2.5	-11.120	0.027	0.046	-11.125	-0.002	0.004	-0.002
3.0	-13.344	0.083	0.044	-13.343	-0.002	0.005	-0.001
3.5	-15.568	0.076	0.044	-15.531	-0.002	0.007	-0.001
3.0	-13.344	0.082	0.046	-13.342	-0.003	0.006	-0.001
2.5	-11.120	0.091	0.049	-11.124	-0.003	0.006	-0.001
2.0	-8.896	0.037	0.112	-8.875	-0.002	0.005	-0.001
1.5	-6.672	-0.018	0.054	-6.686	-0.003	0.004	-0.001
1.0	-4.448	-0.011	0.058	-4.437	-0.001	0.003	-0.001
0.5	-2.224	-0.004	0.062	-2.159	-0.001	0.002	-0.001
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

โดยผลจากตารางที่ 7.20 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.19 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fz ลบที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.21 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0

ตารางที่ 7.21 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดแรง Fz ลบ

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงหลักที่วัดได้	ความผิดพลาดของแรง Fz		
นน. (lb)	Fz (N)	Fz (N)	(N)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%
0.5	-2.224	-2.159	0.065	-2.94%	-0.42%
1.0	-4.448	-4.378	0.071	-1.58%	-0.45%
1.5	-6.672	-6.656	0.016	-0.24%	-0.10%
2.0	-8.896	-8.905	-0.009	0.10%	0.06%
2.5	-11.120	-11.125	-0.005	0.04%	0.03%
3.0	-13.344	-13.343	0.001	-0.01%	-0.01%
3.5	-15.568	-15.531	0.037	-0.24%	-0.24%
3.0	-13.344	-13.342	0.002	-0.01%	-0.01%
2.5	-11.120	-11.124	-0.004	0.03%	0.02%
2.0	-8.896	-8.875	0.021	-0.23%	-0.13%
1.5	-6.672	-6.686	-0.014	0.20%	0.09%
1.0	-4.448	-4.437	0.011	-0.24%	-0.07%
0.5	-2.224	-2.159	0.065	-2.92%	-0.42%
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%

ตารางที่ 7.21 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fz ลบ จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fz ลบจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ -0.45 %ฟูลสเกล ที่แรง -4.448 นิวตัน โดยแรง Fz ฟูลสเกลลบมีค่า -15.568 นิวตัน และจะเห็นว่า การวัดแรง Fz ลบในช่วงการเพิ่มน้ำหนักและลดน้ำหนักก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 7.21 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.57 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงในการวัดแรง Fz ลบ

ตารางที่ 7.22 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านบวก

ค่าโหลดที่ใส่		ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	Fz (N)	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8
0.0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	2.224	0	17	0	19	-1	19	0	18
1.0	4.448	0	34	0	38	-2	39	0	37
1.5	6.672	0	51	0	57	-3	59	0	56
2.0	8.896	0	69	0	79	-4	78	1	72
2.5	11.120	0	86	0	99	-5	99	1	91
3.0	13.344	0	103	0	119	-6	120	1	108
3.5	15.568	0	120	-1	140	-8	139	2	124
3.0	13.344	0	102	0	120	-6	120	1	108
2.5	11.120	0	85	0	100	-5	99	1	91
2.0	8.896	0	68	0	81	-4	79	1	72
1.5	6.672	0	51	0	60	-3	59	0	56
1.0	4.448	0	33	0	40	-2	39	0	38
0.5	2.224	0	16	0	21	-1	18	0	19
0.0	0.000	0	1	0	2	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.23 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ด้านบวก

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Fz (N)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	2.224	0.005	0.001	2.188	0.001	-0.001	0.000
1.0	4.448	0.011	0.007	4.437	0.002	-0.001	0.000
1.5	6.672	0.017	0.012	6.686	0.002	0.000	0.000
2.0	8.896	-0.043	0.011	8.933	0.009	-0.002	-0.001
2.5	11.120	-0.038	0.020	11.242	0.011	-0.001	-0.001
3.0	13.344	-0.033	0.028	13.491	0.015	0.001	-0.001
3.5	15.568	-0.154	-0.031	15.678	0.021	0.000	0.000
3.0	13.344	-0.036	0.030	13.492	0.016	0.002	-0.001
2.5	11.120	-0.041	0.022	11.243	0.012	0.000	-0.001
2.0	8.896	-0.047	0.016	8.994	0.012	0.000	-0.001
1.5	6.672	0.013	0.012	6.776	0.005	-0.001	0.000
1.0	4.448	0.007	0.009	4.498	0.003	0.001	0.000
0.5	2.224	0.000	-0.001	2.218	0.003	-0.001	0.000
0.0	0.000	-0.002	-0.001	0.089	0.002	-0.001	0.000

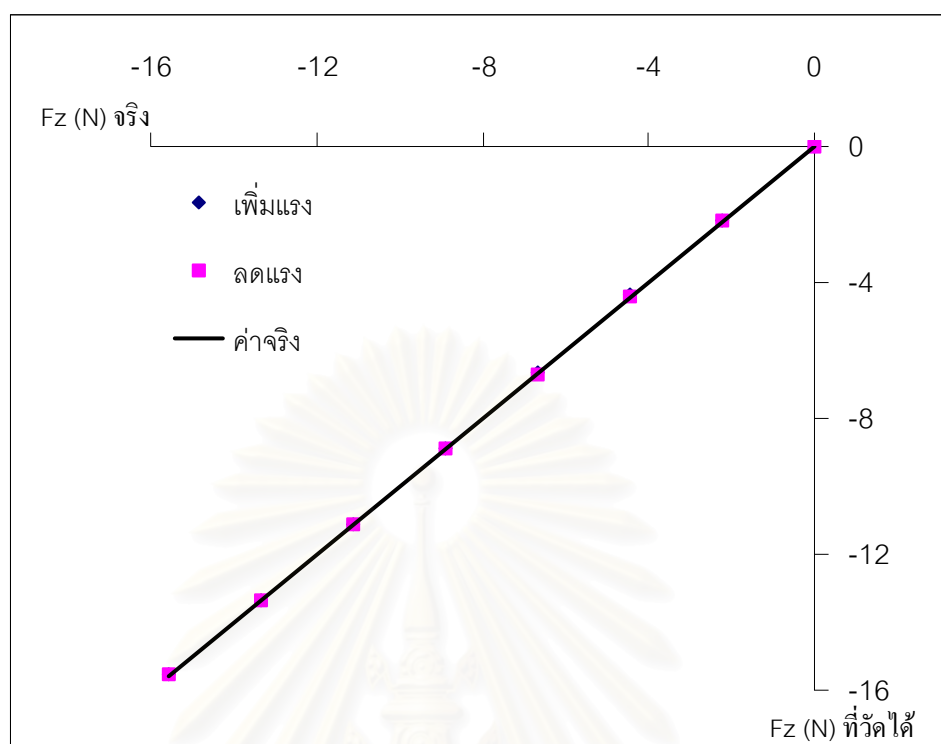
ผลจากตารางที่ 7.23 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.22 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าแรง Fz บวกที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.24 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีความเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0

ตารางที่ 7.24 แสดงค่าความผิดพลาดของของการวัดแรง Fz บวก

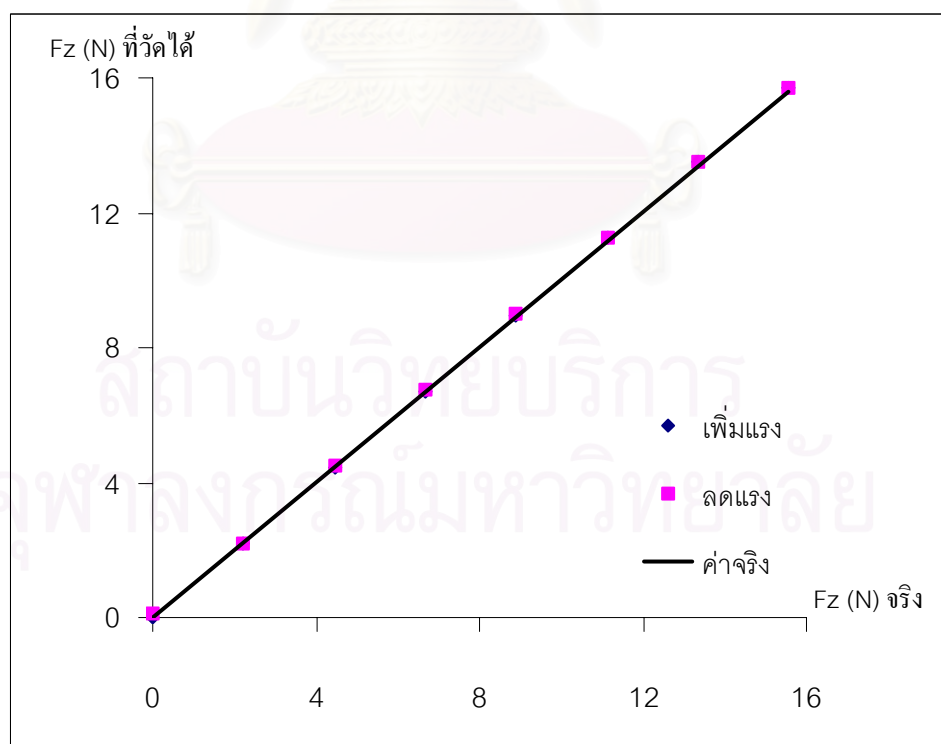
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงหลักที่วัดได้	ความผิดพลาดของแรง Fz		
นน. (lb)	Fz (N)	Fz (N)	(N)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%
0.5	2.224	2.188	-0.036	-1.61%	-0.23%
1.0	4.448	4.437	-0.011	-0.24%	-0.07%
1.5	6.672	6.686	0.014	0.21%	0.09%
2.0	8.896	8.933	0.037	0.41%	0.24%
2.5	11.120	11.242	0.122	1.10%	0.79%
3.0	13.344	13.491	0.147	1.10%	0.95%
3.5	15.568	15.678	0.110	0.71%	0.71%
3.0	13.344	13.492	0.148	1.11%	0.95%
2.5	11.120	11.243	0.123	1.10%	0.79%
2.0	8.896	8.994	0.098	1.10%	0.63%
1.5	6.672	6.776	0.104	1.55%	0.67%
1.0	4.448	4.498	0.050	1.12%	0.32%
0.5	2.224	2.218	-0.006	-0.27%	-0.04%
0.0	0.000	0.089	0.089	-	0.57%

ตารางที่ 7.24 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดแรง Fz บวก จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์พูลสเกล สำหรับการวัดแรง Fz บวกจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.95 %พูลสเกล ที่แรง 13.344 นิวตัน โดยแรง Fz พูลสเกลบวกมีค่า 15.568 นิวตัน และจะเห็นว่าการวัดแรง Fz บวกในช่วงการเพิ่มก่อน น้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงลดก่อนน้ำหนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะมีฮิสเทอรีซิสเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.24 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.58 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงในการวัดแรง Fz บวก



รูปที่ 7.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fz ลบ



รูปที่ 7.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจริงกับแรงที่วัดได้ของ Fz บวก

4. การทดลองเพื่อหาค่าความถูกต้อง (accuracy) เมื่อใช้วัดโมเมนต์ Mz โดยลักษณะการใส่ก้อนน้ำหนักจะแสดง ดังรูปที่ 6.9 ผลการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 7.25-7.30

ตารางที่ 7.25 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz ลง

ค่าโหลดที่ใส่		ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	Mz (N.m)	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8
0.0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	-0.247	53	0	54	-2	53	0	54	1
1.0	-0.494	108	0	108	-5	107	1	108	2
1.5	-0.741	163	-2	163	-9	161	3	161	3
2.0	-0.987	215	-4	214	-12	214	4	214	3
2.5	-1.234	269	-5	268	-15	268	6	268	4
3.0	-1.481	323	-7	320	-18	320	9	319	5
3.5	-1.728	377	-8	374	-21	374	10	373	6
3.0	-1.481	326	-7	324	-19	322	9	321	6
2.5	-1.234	270	-6	269	-16	268	7	268	5
2.0	-0.987	218	-4	219	-12	216	6	216	4
1.5	-0.741	162	-3	163	-9	161	4	163	3
1.0	-0.494	109	-2	112	-6	109	3	110	2
0.5	-0.247	54	-1	57	-2	54	1	56	2
0.0	0.000	-2	0	1	0	0	1	1	1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.26 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz ลง

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Mz (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	-0.247	-0.087	0.019	-0.026	0.001	-0.003	-0.250
1.0	-0.494	-0.174	-0.019	-0.053	0.001	-0.004	-0.504
1.5	-0.741	-0.138	-0.050	-0.135	0.000	-0.001	-0.758
2.0	-0.987	-0.345	0.034	-0.254	0.001	0.000	-1.003
2.5	-1.234	-0.431	0.061	-0.280	0.001	0.001	-1.255
3.0	-1.481	-0.454	-0.027	-0.304	0.001	0.005	-1.500
3.5	-1.728	-0.541	-0.003	-0.360	0.001	0.005	-1.753
3.0	-1.481	-0.335	-0.085	-0.301	-0.002	0.005	-1.513
2.5	-1.234	-0.370	0.007	-0.277	-0.001	0.004	-1.258
2.0	-0.987	-0.165	-0.017	-0.158	0.000	0.002	-1.017
1.5	-0.741	-0.260	0.015	-0.134	0.000	0.001	-0.759
1.0	-0.494	-0.054	0.051	-0.076	0.000	0.001	-0.515
0.5	-0.247	-0.029	0.024	0.009	0.000	0.000	-0.259
0.0	0.000	0.002	0.123	0.063	-0.001	0.001	0.000

ผลจากตารางที่ 7.26 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.25 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าโมเมนต์ Mz ลงที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.27 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมามีค่าใกล้ 0

ตารางที่ 7.27 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mz ลบ

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงหลักที่วัดได้	ความผิดพลาดของโมเมนต์ Mz		
นน. (lb)	Mz (N.m)	Mz (N.m)	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%
0.5	-0.247	-0.250	-0.003	1.39%	0.20%
1.0	-0.494	-0.504	-0.010	2.10%	0.60%
1.5	-0.741	-0.758	-0.017	2.35%	1.01%
2.0	-0.987	-1.003	-0.015	1.52%	0.87%
2.5	-1.234	-1.255	-0.021	1.69%	1.21%
3.0	-1.481	-1.500	-0.019	1.26%	1.08%
3.5	-1.728	-1.753	-0.024	1.42%	1.42%
3.0	-1.481	-1.513	-0.031	2.12%	1.82%
2.5	-1.234	-1.258	-0.023	1.89%	1.35%
2.0	-0.987	-1.017	-0.029	2.95%	1.69%
1.5	-0.741	-0.759	-0.019	2.51%	1.08%
1.0	-0.494	-0.515	-0.021	4.25%	1.21%
0.5	-0.247	-0.259	-0.012	4.71%	0.67%
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%

ตารางที่ 7.27 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดโมเมนต์ Mz ลบ จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดโมเมนต์ Mz ลบจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 1.82 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ -1.481 นิวตันเมตร โดยโมเมนต์ Mz ฟูลสเกลลบมีค่า -1.728 นิวตันเมตร และจะเห็นว่า การวัดโมเมนต์ Mz ลบในช่วงการเพิ่มก้อนน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงลดก้อนน้ำหนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะมีฮิสเทอรีซิสเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.27 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.59 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ ทั้งขณะเพิ่มและลดก้อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงในการวัดโมเมนต์ Mz ลบ

ตารางที่ 7.28 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz บวก

ค่าโหลดที่ใส่		ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
นน. (lb)	Mz (N.m)	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8
0.0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.247	-52	0	-53	2	-52	-2	-52	-1
1.0	0.494	-106	0	-107	4	-105	-4	-105	-3
1.5	0.741	-160	0	-160	6	-158	-6	-158	-5
2.0	0.987	-214	0	-212	8	-210	-9	-210	-7
2.5	1.234	-268	0	-265	9	-263	-12	-263	-9
3.0	1.481	-321	-1	-317	11	-315	-15	-315	-11
3.5	1.728	-375	-1	-371	12	-368	-17	-368	-14
3.0	1.481	-322	-1	-318	10	-316	-15	-317	-13
2.5	1.234	-270	0	-266	8	-264	-12	-265	-11
2.0	0.987	-217	0	-213	7	-211	-10	-213	-10
1.5	0.741	-163	0	-160	6	-158	-7	-159	-8
1.0	0.494	-110	0	-107	5	-106	-5	-108	-5
0.5	0.247	-56	0	-54	3	-53	-2	-55	-2
0.0	0.000	-1	0	0	1	0	0	-1	0

ตารางที่ 7.29 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ เมื่อใส่โมเมนต์ Mz บวก

ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (N หรือ N.m)					
นน. (lb)	Mz (N.m)	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.247	0.022	-0.025	-0.036	-0.001	0.000	0.245
1.0	0.494	0.047	0.008	-0.101	-0.001	0.000	0.495
1.5	0.741	0.133	0.041	-0.164	-0.001	0.001	0.744
2.0	0.987	0.217	0.130	-0.258	-0.001	-0.001	0.990
2.5	1.234	0.303	0.159	-0.382	-0.002	-0.002	1.239
3.0	1.481	0.385	0.190	-0.505	-0.001	-0.001	1.484
3.5	1.728	0.412	0.223	-0.631	-0.001	-0.001	1.734
3.0	1.481	0.450	0.189	-0.595	0.000	-0.001	1.490
2.5	1.234	0.369	0.217	-0.471	0.000	-0.001	1.246
2.0	0.987	0.344	0.243	-0.408	0.002	-0.002	0.999
1.5	0.741	0.196	0.214	-0.284	0.003	-0.001	0.749
1.0	0.494	0.233	0.181	-0.159	0.003	-0.001	0.504
0.5	0.247	0.148	0.152	-0.035	0.002	0.000	0.255
0.0	0.000	0.061	0.060	0.030	0.001	0.000	0.002

ผลจากตารางที่ 7.29 นี้ได้มาจากการนำผลในตารางที่ 7.28 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2) ซึ่งจะเห็นว่าโมเมนต์ Mz บวกที่สามารถวัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงพอสมควร ซึ่งค่าความผิดพลาดส่วนนี้จะแสดงในตารางที่ 7.30 ส่วนแรงและโมเมนต์ที่เหลือนั้นควรจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งค่าที่วัดออกมาก็มีค่าใกล้ 0

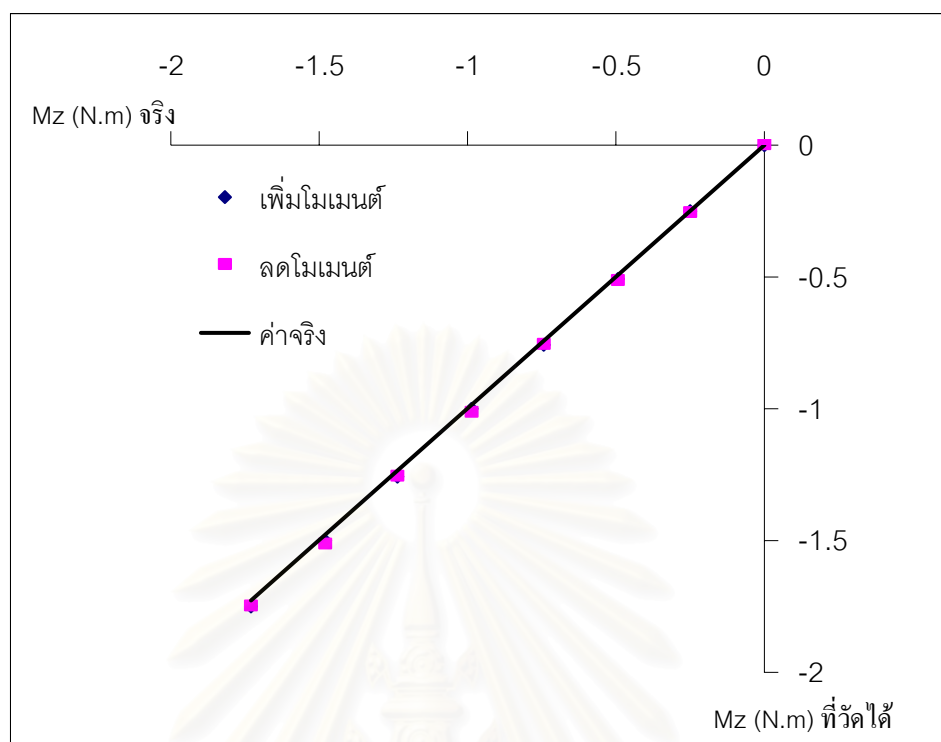
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.30 แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดโมเมนต์ Mz บวก

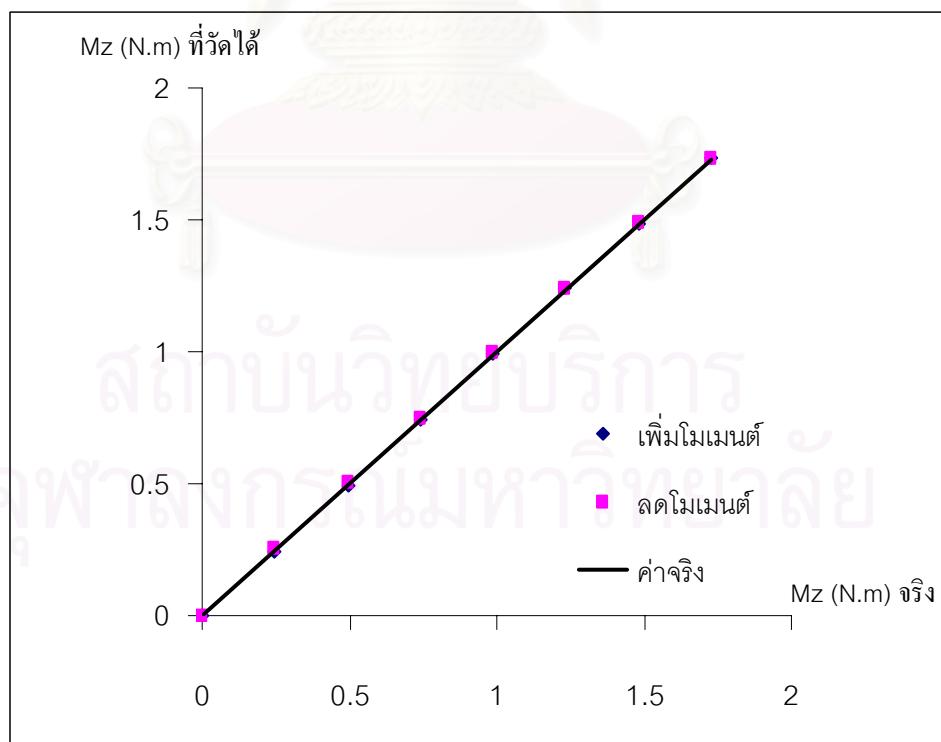
ค่าแรงและโมเมนต์ที่ใส่จริง		ค่าแรงหลักที่วัดได้	ความผิดพลาดของโมเมนต์ Mz		
นน. (lb)	Mz (N.m)	Mz (N.m)	(N.m)	%reading	%full scale
0.0	0.000	0.000	0.000	-	0.00%
0.5	0.247	0.245	-0.002	-0.96%	-0.14%
1.0	0.494	0.495	0.001	0.24%	0.07%
1.5	0.741	0.744	0.004	0.47%	0.20%
2.0	0.987	0.990	0.002	0.25%	0.14%
2.5	1.234	1.239	0.005	0.40%	0.28%
3.0	1.481	1.484	0.003	0.18%	0.15%
3.5	1.728	1.734	0.006	0.36%	0.36%
3.0	1.481	1.490	0.009	0.57%	0.49%
2.5	1.234	1.246	0.012	0.96%	0.69%
2.0	0.987	0.999	0.012	1.21%	0.69%
1.5	0.741	0.749	0.008	1.12%	0.48%
1.0	0.494	0.504	0.011	2.16%	0.62%
0.5	0.247	0.255	0.008	3.34%	0.48%
0.0	0.000	0.002	0.002	-	0.13%

ตารางที่ 7.30 เป็นตารางที่ใช้หาค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดโมเมนต์ Mz บวก จะเห็นว่าค่าความถูกต้องเมื่อบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล สำหรับการวัดโมเมนต์ Mz บวกจะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.69 %ฟูลสเกล ที่โมเมนต์ 1.234 นิวตันเมตร และ 0.987 นิวตันเมตร โดยโมเมนต์ Mz ฟูลสเกลบวกมีค่า 1.728 นิวตันเมตร และจะเห็นว่าการวัดโมเมนต์ Mz บวกในช่วงการเพิ่มก่อนน้ำหนักจะผิดพลาดน้อยกว่าการวัดในช่วงลดก่อนน้ำหนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะมีฮิสเทอรีซิสเล็กน้อย

จากตารางที่ 7.30 จะนำมาสร้างเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.60 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้ทั้งขณะเพิ่มและลดก่อนน้ำหนัก กับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงในการวัดโมเมนต์ Mz บวก



รูปที่ 7.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mz ลบ



รูปที่ 7.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ของ Mz บวก

จากการทดลองข้างต้นจะสามารถหาความถูกต้อง (accuracy) โดยจะบอกในรูปของความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ฟูสเกลของ Sensor III เมื่อใช้วัดแรงและโมเมนต์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ความถูกต้องเมื่อวัดแรง Fx มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 2.07 %
- ความถูกต้องเมื่อวัดแรง Fy มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 1.15 %
- ความถูกต้องเมื่อวัดแรง Fz มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 0.95 %
- ความถูกต้องเมื่อวัดโมเมนต์ Mx มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 1.28 %
- ความถูกต้องเมื่อวัดโมเมนต์ My มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 0.74 %
- ความถูกต้องเมื่อวัดโมเมนต์ Mz มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 1.82 %

เมื่อใช้วัดแรง Fx Fy และ Fz ในช่วง ± 15.568 นิวตัน ใช้วัดโมเมนต์ Mx และ My ในช่วง ± 2.257 นิวตันเมตร และใช้วัดโมเมนต์ Mz ในช่วง ± 1.728 นิวตันเมตร (ซึ่งเป็นค่าฟูสเกลในการทดลองนี้นั่นเอง)

เหตุที่ทำให้ทำการทดลองในช่วงของฟูสเกลค่อนข้างแคบ เป็นเพราะขนาดของโต๊ะปรับเทียบค่ามีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้มีพื้นที่ในการใส่ก้อนน้ำหนักค่อนข้างจำกัด รวมไปถึงมีก้อนน้ำหนักจำกัดด้วย ซึ่งหากโต๊ะปรับเทียบค่ามีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีก้อนน้ำหนักมาตรฐานมากขึ้น ก็จะทำให้สามารถวัดในช่วงของฟูสเกลมีค่ามากขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2.2 การหาค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability) ของ Sensor III

1. การทดลองเพื่อหาค่ารีพีทอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง Fx และโมเมนต์ My โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ดังรูปที่ 6.10 ก้อนน้ำหนักที่ใช้มีขนาด 2 ปอนด์ ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x ลบจะทำให้เกิด Fx -8.896 นิวตัน และเกิด My 1.290 นิวตันเมตร แต่ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน x บวกจะทำให้เกิด Fx 8.896 นิวตัน และเกิด My -1.290 นิวตันเมตร โดยจะทำการวัดซ้ำกันทั้งหมด 7 ครั้ง ดังตารางที่ 7.31 และ 7.32

ตารางที่ 7.31 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน x ลบ

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้		
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Fx(N)	My(N.m)	
1	6	-519	-70	-13	-33	520	73	0	-8.845	1.289	
2	6	-519	-70	-13	-33	520	73	0	-8.845	1.289	
3	6	-517	-70	-13	-33	519	73	0	-8.844	1.285	
4	5	-518	-70	-13	-33	520	73	0	-8.843	1.288	
5	5	-519	-70	-13	-33	520	73	0	-8.844	1.289	
6	5	-518	-70	-13	-33	520	73	0	-8.843	1.288	
7	6	-518	-70	-13	-33	520	73	0	-8.844	1.288	
									ค่า Max	-8.843	1.289
									ค่า Min	-8.845	1.285

ตารางที่ 7.32 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน x บวก

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้		
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Fx(N)	My(N.m)	
1	-7	516	72	10	34	-517	-72	7	8.910	-1.282	
2	-8	517	72	11	34	-517	-72	6	8.911	-1.283	
3	-7	516	71	11	34	-517	-73	6	8.910	-1.282	
4	-8	516	71	11	34	-518	-73	6	8.910	-1.283	
5	-7	517	71	11	33	-518	-73	5	8.910	-1.284	
6	-8	516	71	12	33	-517	-73	7	8.909	-1.282	
7	-8	516	71	12	34	-520	-73	6	8.907	-1.285	
									ค่า Max	8.911	-1.282
									ค่า Min	8.907	-1.285

2. การทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโอะบิลิตีเมื่อใช้วัดแรง F_y และโมเมนต์ M_x โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ดังรูปที่ 6.10 ก้อนน้ำหนักที่ใช้มีขนาด 2 ปอนด์ ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y ลงจะทำให้เกิด $F_y = -8.896$ นิวตัน และเกิด $M_x = -1.290$ นิวตันเมตร แต่ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน y บนจะทำให้เกิด $F_y 8.896$ นิวตัน และเกิด $M_x 1.290$ นิวตันเมตร โดยจะทำการวัดซ้ำกันทั้งหมด 7 ครั้ง ดังตารางที่ 7.33 และ 7.34

ตารางที่ 7.33 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโอะบิลิตีในแนวแกน y ลง

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	$F_y(N)$	$M_x(N.m)$	
1	75	9	-3	-523	-76	-5	6	519	-8.779	-1.296	
2	75	9	-3	-520	-76	-5	6	517	-8.780	-1.290	
3	74	9	-3	-520	-76	-5	6	516	-8.721	-1.289	
4	75	9	-3	-520	-76	-5	5	517	-8.780	-1.290	
5	74	9	-3	-520	-76	-5	5	516	-8.721	-1.289	
6	74	9	-3	-520	-76	-5	5	516	-8.721	-1.289	
7	74	9	-5	-521	-76	-5	5	516	-8.721	-1.290	
									ค่า Max	-8.721	-1.289
									ค่า Min	-8.780	-1.296

ตารางที่ 7.34 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโอะบิลิตีในแนวแกน y บน

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	$F_y(N)$	$M_x(N.m)$	
1	-74	0	7	524	77	0	-8	-519	8.751	1.297	
2	-74	0	7	525	78	0	-8	-517	8.812	1.296	
3	-74	0	7	524	78	0	-8	-517	8.812	1.295	
4	-75	0	7	524	77	0	-8	-517	8.811	1.295	
5	-74	0	7	524	77	0	-8	-517	8.752	1.295	
6	-74	0	7	524	77	0	-7	-517	8.752	1.295	
7	-74	-1	7	525	77	0	-7	-518	8.752	1.297	
									ค่า Max	8.812	1.297
									ค่า Min	8.751	1.295

3. การทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง Fz โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ดังรูปที่ 6.6 และ 6.7 ก้อนน้ำหนักที่ใช้มีขนาด 2 ปอนด์ ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ลบจะทำให้เกิด Fz = -8.896 นิวตัน แต่ถ้าใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z บวกจะทำให้เกิด Fz = 8.896 นิวตัน โดยจะทำการวัดซ้ำกันทั้งหมด 7 ครั้ง ดังตารางที่ 7.35 และ 7.36

ตารางที่ 7.35 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z ลบ

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Fz(N)
1	0	-69	0	-75	5	-77	-1	-72	-8.785
2	0	-70	0	-75	5	-76	-1	-73	-8.813
3	0	-69	0	-75	5	-77	-2	-73	-8.814
4	0	-69	0	-75	5	-77	-2	-73	-8.814
5	0	-69	0	-75	5	-77	-2	-73	-8.814
6	0	-69	0	-75	5	-76	-2	-73	-8.784
7	0	-69	0	-75	5	-77	-2	-74	-8.845
								ค่า Max	-8.784
								ค่า Min	-8.845

ตารางที่ 7.36 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z บวก

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Fz(N)
1	0	71	0	71	-4	74	0	71	8.601
2	0	70	0	73	-4	75	0	70	8.632
3	0	70	0	73	-3	75	0	71	8.661
4	0	71	0	73	-4	74	1	71	8.661
5	0	72	0	71	-4	74	1	76	8.781
6	0	71	0	73	-4	76	1	74	8.812
7	0	71	0	74	-4	75	0	73	8.781
								ค่า Max	8.812
								ค่า Min	8.601

4. การทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้เมื่อใช้วัตโมเมนต์ Mz โดยจะใส่ก้อนน้ำหนักในแนวแกน z ดังรูปที่ 6.9 ก้อนน้ำหนักที่ใช้มีขนาดข้างละ 2 ปอนด์ ซึ่งจะทำให้เกิด Mz บวกเท่ากับ 0.987 นิวตันเมตร หรือเกิด Mz ลบเท่ากับ -0.987 นิวตันเมตร โดยจะทำการวัดซ้ำกันทั้งหมด 7 ครั้ง ดังตารางที่ 7.37 และ 7.38

ตารางที่ 7.37 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z ลบ

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Mz(N.m)
1	218	-4	215	-12	214	4	211	2	-1.004
2	217	-4	214	-12	213	6	211	2	-1.000
3	217	-4	214	-13	214	3	212	2	-1.002
4	217	-4	214	-13	214	3	212	2	-1.002
5	218	-4	215	-13	214	3	211	2	-1.004
6	218	-5	214	-13	214	3	211	2	-1.002
7	218	-2	214	-13	214	3	211	2	-1.002
ค่า Max									-1.000
ค่า Min									-1.004

ตารางที่ 7.38 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีฟิโตะบิลิตี้ในแนวแกน z บวก

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)								ค่าแรงที่วัดได้
	ε1	ε2	ε3	ε4	ε5	ε6	ε7	ε8	Mz(N.m)
1	-211	-3	-210	6	-208	-9	-206	-8	0.977
2	-212	-3	-210	6	-209	-9	-206	-8	0.979
3	-212	-3	-210	6	-208	-9	-206	-8	0.978
4	-212	-2	-210	6	-208	-9	-206	-8	0.978
5	-212	-2	-210	6	-208	-9	-206	-7	0.978
6	-213	-2	-210	6	-208	-9	-207	-7	0.981
7	-212	-3	-211	6	-209	-10	-206	-7	0.981
ค่า Max									0.981
ค่า Min									0.977

จากตารางที่ 7.31 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_x ลบมีค่า 0.013 % ในขณะที่เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_y บวกจะมีค่า 0.177 %

จากตารางที่ 7.32 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_x บวกมีค่า 0.026 % ในขณะที่เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_y ลบจะมีค่า 0.133 %

จากตารางที่ 7.33 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_y ลบมีค่า 0.379 % ในขณะที่เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_x ลบจะมีค่า 0.310 %

จากตารางที่ 7.34 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_y บวกมีค่า 0.392 % ในขณะที่เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_y บวกจะมีค่า 0.089 %

จากตารางที่ 7.35 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_z ลบมีค่า 0.392 %

จากตารางที่ 7.36 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_z บวกมีค่า 1.355 %

จากตารางที่ 7.37 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_z ลบมีค่า 0.231 %

จากตารางที่ 7.38 จะสามารถนำไปหาค่ารีฟิโอะบิลิตี้ได้ตามสมการที่ 6.4 โดยจะได้ว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดโมเมนต์ M_z บวกมีค่า 0.231 %

จะเห็นได้ว่า Sensor III มีค่ารีฟิโอะบิลิตี้ที่ตีมาก แต่จะสังเกตเห็นว่าค่ารีฟิโอะบิลิตี้เมื่อใช้วัดแรง F_z บวกมีค่ามากกว่าค่าอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะ การใส่แรงในแนวนั้นทำได้ยากกว่าแนวอื่น โดยการวางก้อนน้ำแต่ละครั้งอาจจะเอียงกันเล็กน้อย ทำให้แรงที่ได้จริงในแต่ละครั้งไม่ตรงกัน ทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนไปบ้าง สำหรับค่าฟูลสเกลที่ใช้ในการคำนวณค่ารีฟิโอะบิลิตี้ตามสมการที่ (6.4) นั้นจะใช้ค่าเดียวกับที่ใช้ในการหาค่าความถูกต้อง

จากการทดลองข้างต้นจะสามารถหาวิธีพีทอะบิลิตี้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกลของ Sensor III เมื่อใช้วัดแรงและโมเมนต์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดแรง Fx มีค่าน้อยกว่า 0.026 %
- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดแรง Fy มีค่าน้อยกว่า 0.392 %
- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดแรง Fz มีค่าน้อยกว่า 1.355 %
- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดโมเมนต์ Mx มีค่าน้อยกว่า 0.310 %
- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดโมเมนต์ My มีค่าน้อยกว่า 0.177 %
- วิธีพีทอะบิลิตี้ในการวัดโมเมนต์ Mz มีค่าน้อยกว่า 0.231 %

เมื่อใช้วัดแรง Fx Fy และ Fz ในช่วง ± 15.568 นิวตัน ใช้วัดโมเมนต์ Mx และ My ในช่วง ± 2.257 นิวตันเมตร และใช้วัดโมเมนต์ Mz ในช่วง ± 1.728 นิวตันเมตร (ซึ่งเป็นค่าฟูลสเกลในการทดลองนี้นั่นเอง)

เหตุที่ทำให้ทำการทดลองในช่วงของฟูลสเกลค่อนข้างแคบ เป็นเพราะขนาดของโต๊ะปรับเทียบค่ามีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้มีพื้นที่ในการใส่ก้อนน้ำหนักค่อนข้างจำกัด รวมไปถึงมีก้อนน้ำหนักจำกัดด้วย ซึ่งหากโต๊ะปรับเทียบค่ามีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีก้อนน้ำหนักมาตรฐานมากขึ้น ก็จะทำให้สามารถวัดในช่วงของฟูลสเกลมีค่ามากขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2.3 การหาค่าความละเอียด (resolution) ของ Sensor III

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับแรงตัวนี้ วัดแรงได้โดยผ่านการวัดค่าความเครียด ดังนั้น ความละเอียดของเครื่องมือวัดแรงนี้ก็จะขึ้นอยู่กับ ค่าความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดด้วย โดยความละเอียดของอุปกรณ์วัดความเครียดมีค่า 1 ไมโครสเตรน ดังนั้นถ้าเราต้องการหาค่าความละเอียดของการวัดแรงในแนว Fx ก็คือ ต้องการหาค่าแรง Fx ที่ทำให้เกิดค่าความเครียด 1 ไมโครสเตรนนั่นเอง

ค่าความไวของการวัดแรง Fx มีค่า 8.177 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน ดังนั้นค่าความละเอียดของการวัดแรง Fx จะเท่ากับ $1/8.177 = 0.122$ นิวตันนั่นเอง ค่าความไวของการวัดแรง Fy และ Fz มีค่า 8.365 และ 8.334 ไมโครสเตรนต่อนิวตัน ส่วนค่าความไวของการวัดโมเมนต์ Mx My และ Mz มีค่า 408.320 405.950 และ 213.703 ไมโครสเตรนต่อนิวตันเมตร ตามลำดับ

ดังนั้นความละเอียดในการวัดแรงและโมเมนต์ต่าง ๆ ของ Sensor III มีค่าดังนี้

- ความละเอียดในการวัดแรง Fx เท่ากับ 0.122 นิวตัน
- ความละเอียดในการวัดแรง Fy เท่ากับ 0.120 นิวตัน
- ความละเอียดในการวัดแรง Fz เท่ากับ 0.120 นิวตัน
- ความละเอียดในการวัดโมเมนต์ Mx เท่ากับ 0.002 นิวตันเมตร
- ความละเอียดในการวัดโมเมนต์ My เท่ากับ 0.002 นิวตันเมตร
- ความละเอียดในการวัดโมเมนต์ Mz เท่ากับ 0.005 นิวตันเมตร

7.3 การทดลองวัดแรงและโมเมนต์ในทุกทิศทางของ Sensor III

ในการทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อดูว่าเมื่อมีการวัดแรงและโมเมนต์ในทุกทิศทาง แล้วผลที่ได้จะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยลักษณะการใส่โหลดจะแสดงดังรูปที่ 6.11 ซึ่งทำให้เกิดแรงและโมเมนต์จริงดังนี้ $F_x -4.448$ นิวตัน $F_y -4.448$ นิวตัน $F_z -4.448$ นิวตัน $M_x -0.645$ นิวตันเมตร $M_y 1.290$ นิวตันเมตร และ $M_z 0.247$ นิวตันเมตร โดยจะทำการวัดทั้งหมด 7 ครั้ง ผลการทดลองมีค่าดังตารางที่ 7.39 – 7.42

ตารางที่ 7.39 แสดงผลการวัดค่าความเครียดที่สเตรนเกจชุดต่าง ๆ เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11

ครั้งที่	ค่าความเครียดที่วัดได้ (ไมโครสเตรน)							
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8
1	-8	-545	-91	-306	-123	475	-14	209
2	-11	-547	-90	-307	-123	476	-14	212
3	-9	-544	-90	-306	-123	475	-14	211
4	-10	-548	-90	-306	-123	476	-13	211
5	-10	-547	-91	-307	-123	475	-13	212
6	-11	-547	-90	-306	-123	475	-13	211
7	-10	-546	-91	-307	-123	476	-13	211

ตารางที่ 7.40 แสดงผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11

ครั้งที่	แรงและโมเมนต์ที่วัดได้					
	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$	$M_x(N.m)$	$M_y(N.m)$	$M_z(N.m)$
1	-4.345	-4.427	-4.300	-0.632	1.274	0.254
2	-4.281	-4.241	-4.264	-0.636	1.278	0.256
3	-4.282	-4.367	-4.208	-0.634	1.273	0.254
4	-4.346	-4.300	-4.295	-0.634	1.279	0.254
5	-4.405	-4.304	-4.297	-0.636	1.276	0.255
6	-4.345	-4.245	-4.295	-0.634	1.276	0.255
7	-4.403	-4.302	-4.267	-0.635	1.276	0.255

หมายเหตุ ตารางที่ 7.40 นี้ได้จากการนำผลในตารางที่ 7.39 ไปคำนวณตามสมการที่ (3.2)

ตารางที่ 7.41 แสดงผลความผิดพลาดของการวัดแรงและโมเมนต์เป็น (%reading) เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11

ครั้งที่	ความผิดพลาดของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (%reading)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	-2.32%	-0.48%	-3.34%	-2.09%	-1.24%	2.77%
2	-3.76%	-4.66%	-4.13%	-1.39%	-0.96%	3.70%
3	-3.73%	-1.81%	-5.40%	-1.73%	-1.35%	2.77%
4	-2.30%	-3.34%	-3.45%	-1.76%	-0.86%	2.73%
5	-0.98%	-3.24%	-3.39%	-1.37%	-1.05%	3.21%
6	-2.32%	-4.57%	-3.43%	-1.78%	-1.05%	3.26%
7	-1.01%	-3.28%	-4.06%	-1.56%	-1.05%	3.21%

ตารางที่ 7.42 แสดงผลความผิดพลาดของการวัดแรงและโมเมนต์เป็น (%full scale) เมื่อใส่โหลดดังรูปที่ 6.11

ครั้งที่	ความผิดพลาดของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ (%full scale)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	-0.66%	-0.14%	-0.95%	-0.60%	-0.71%	0.40%
2	-1.07%	-1.33%	-1.18%	-0.40%	-0.55%	0.53%
3	-1.07%	-0.52%	-1.54%	-0.49%	-0.77%	0.40%
4	-0.66%	-0.95%	-0.99%	-0.50%	-0.49%	0.39%
5	-0.28%	-0.93%	-0.97%	-0.39%	-0.60%	0.46%
6	-0.66%	-1.30%	-0.98%	-0.51%	-0.60%	0.47%
7	-0.29%	-0.94%	-1.16%	-0.45%	-0.60%	0.46%

ตารางที่ 7.40-7.42 จะเห็นว่าผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงและโมเมนต์จริงพอสมควร โดยหากคิดเป็นความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ค่าที่อ่าน (%reading) แล้วจะผิดพลาดไม่เกิน 5.40 % และหากคิดเป็นความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซ็นต์ฟูลสเกล (%full scale) จะผิดพลาดไม่เกิน 1.54 % โดยค่าฟูลสเกลที่ใช้ก็เป็นค่าฟูลสเกลเดียวกับค่าที่ใช้ในการทดลองหาความถูกต้องและรีพีทอะบิลิตี้นั่นเอง

นอกจากนี้จะเห็นว่าในการวัดทั้ง 7 ครั้งนั้นผลของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้ในแต่ละครั้งก็มีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า Sensor III สามารถที่จะนำไปใช้ในการวัดแรงและโมเมนต์จริงได้เป็นอย่างดี

7.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่าง Sensor II และ Sensor III

7.4.1 การเปรียบเทียบด้วยค่าคอนดิชันนัมเบอร์

ค่าคอนดิชันนัมเบอร์ระหว่าง Sensor II และ Sensor III สามารถเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

ตารางที่ 7.43 แสดงผลเปรียบเทียบค่าคอนดิชันนัมเบอร์ของ Sensor II และ Sensor III

วิธีที่ใช้หา	ค่าคอนดิชันนัมเบอร์	
	Sensor II	Sensor III
ไฟไนต์เอลิเมนต์	2.5168	1.6708
การทดลอง	7.0287	1.4737

หมายเหตุ ค่าจากการทดลองของ Sensor II ได้มาจากวิทยานิพนธ์ของผู้ทำการวิจัยรุ่นก่อน [5]

จากตารางที่ 7.43 จะเห็นว่า Sensor III มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า Sensor II ทั้งจากการหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ จากการทดลองจริง

7.4.2 การเปรียบเทียบด้วยค่าความไว

ค่าความไวระหว่าง Sensor II และ Sensor III สามารถเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

ตารางที่ 7.44 แสดงผลเปรียบเทียบความไวของ Sensor II และ Sensor III

ชนิดโหลด	วิธีที่ใช้หา	ความไวในการวัดแรงและโมเมนต์ชนิดต่าง ๆ ($\mu\text{strain}/\text{N}$ หรือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$)		% การเปลี่ยนแปลง
		Sensor II	Sensor III	
Fx	ไฟไนต์เอลิเมนต์	1.313	3.109	136.79%
	การทดลอง	0.576	8.177	1319.62%
Fy	ไฟไนต์เอลิเมนต์	1.313	3.109	136.79%
	การทดลอง	0.567	8.365	1375.31%
Fz	ไฟไนต์เอลิเมนต์	2.095	3.673	75.32%
	การทดลอง	2.240	8.334	272.05%
Mx	ไฟไนต์เอลิเมนต์	174.743	178.105	1.92%
	การทดลอง	192.300	408.320	112.33%
My	ไฟไนต์เอลิเมนต์	174.743	178.105	1.92%
	การทดลอง	190.315	405.950	113.30%
Mz	ไฟไนต์เอลิเมนต์	56.475	98.739	74.84%
	การทดลอง	63.149	213.703	238.41%

หมายเหตุ ค่าจากการทดลองของ Sensor II ได้มาจากวิทยานิพนธ์ของผู้ทำการวิจัยรุ่นก่อน [5]

จากตารางที่ 7.44 จะเห็นว่าค่าความไวของ Sensor III มีค่ามากกว่า Sensor II มาก ทุกชนิดโหลด ทั้งในส่วนผลที่ได้จากการทดลองและจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่จะเพิ่มขึ้นมากเป็นพิเศษในการวัดแรง Fx และ Fy ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการปรับปรุงอย่างมาก

จากการเปรียบเทียบในตารางที่ 7.43 และ 7.44 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า Sensor III มีประสิทธิภาพดีกว่า Sensor II จริงทั้งผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

7.4.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor III

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความไวของ Sensor III ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีผลต่างกันเพียงใด

ตารางที่ 7.45 แสดงผลเปรียบเทียบความไวของ Sensor III ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชนิดโหลด	ความไวในการวัดแรงและโมเมนต์ชนิดต่าง ๆ ($\mu\text{strain}/\text{N}$ หรือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$)		%ความผิดพลาด
	ผลเฉลี่ยจากการทดลอง	ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์	
Fx	8.177	3.109	-61.98%
Fy	8.365	3.109	-62.83%
Fz	8.334	3.673	-55.93%
Mx	408.320	178.105	-56.38%
My	405.950	178.105	-56.13%
Mz	213.703	98.739	-53.80%

จากตารางที่ 7.45 จะเห็นว่าผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าค่าจริงอยู่ประมาณ 60 % ทุกชนิดของโหลด ซึ่งถึงแม้ว่าจะได้ค่าที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงนัก แต่ก็เห็นว่าแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นไปในทางเดียวกัน ทำให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเบื้องต้นได้ ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจมาจากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

1. ค่าคุณสมบัติวัสดุที่ใช้จริงกับค่าที่ใช้ในไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าแตกต่างกัน
2. ขนาดของโครงสร้างจริงกับแบบจำลองมีความแตกต่างกัน
3. เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้เอลิเมนต์แบบเตตระฮีดรอน ซึ่งตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่าความเครียดนั้นจะคงที่ตลอดเอลิเมนต์ ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเกิดเนื่องจากแบ่งเอลิเมนต์หยาบเกินไป โดยหากแบ่งเอลิเมนต์ให้ละเอียดมากขึ้น ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นด้วย
4. สภาพเงื่อนไขขอบเขตบนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองอาจไม่เหมือนกันอย่างสมบูรณ์

5. แรงแและโมเมนต์ในการทดลองจริงกับบนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน เนื่องจากความผิดพลาดของโต๊ะปรับเทียบค่าที่ใช้ในการทดลอง
6. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการติดยึดโครงเหล็ก เนื่องจากพื้นที่การติดยึดโครงเหล็กมีขนาดเล็ก ทำให้ตำแหน่งที่ใช้วัดความเครียดบนชิ้นงานจริง กับบนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกัน
7. ความละเอียดของเครื่องมือวัดและความถูกต้องในการอ่านผล
8. มีความผิดพลาดในการอ่านค่าจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผล

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจรู้แรงขึ้นมาใหม่ (Sensor III) ให้มีประสิทธิภาพดีกว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตัวเก่า (Sensor II) โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้นนี้จะสามารถวัดแรงและโมเมนต์ได้ 6 ทิศทางได้แก่ F_x F_y F_z M_x M_y และ M_z ใช้สเตรนเกจเป็นตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจะสามารถสรุปขั้นตอนและผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ในส่วนของการออกแบบนั้นจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง ซึ่งจะมีมาตรฐานที่เรียกว่าคอนดิชันนัมเบอร์ เป็นตัววัดว่าโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบใดมีประสิทธิภาพดีกว่ากัน ซึ่งในส่วนนี้จะต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงหลาย ๆ ส่วนเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ มีความแข็งแรงและมีความไวในการวัดแรงหรือโมเมนต์ต่าง ๆ มากน้อยเพียงใด มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่าใด โครงสร้างมีการเสียรูปมากน้อยเพียงใด ดูว่าบริเวณใดเกิดความเครียดมากซึ่งจะเป็นจุดที่เหมาะสมที่จะทำการติดสเตรนเกจ จากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้นโดยใช้คอนดิชันนัมเบอร์เป็นตัวเปรียบเทียบพบว่า Sensor III มีประสิทธิภาพดีกว่า Sensor II

2. ในส่วนของการทดลองเปรียบเทียบค่าก็จะเป็นการหาค่าสเตรนคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจชุดต่าง ๆ กับแรงและโมเมนต์ที่มากระทำกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ได้สร้างขึ้นตามลักษณะที่ออกแบบไว้ ซึ่งจากสเตรนคอมไพลเอนซ์เมตริกซ์ที่ได้เมื่อนำไปคำนวณหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ ก็พบว่า Sensor III มีประสิทธิภาพดีกว่า Sensor II จริง

3. ส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนของการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง Sensor III ที่สร้างขึ้น พบว่า Sensor III มีค่าความถูกต้องในการวัดแรงและโมเมนต์น้อยกว่า 2.07 % พูลสเกล และมีค่ารีพีทอะบิลิตี้น้อยกว่า 1.355 % พูลสเกล เมื่อทำการทดลองในช่วงแรงพูลสเกลดังนี้คือ ใช้วัดแรง F_x F_y และ F_z ในช่วง ± 15.568 นิวตัน ใช้วัดโมเมนต์ M_x และ M_y ในช่วง ± 2.257 นิวตันเมตร และใช้วัดโมเมนต์ M_z ในช่วง ± 1.728 นิวตันเมตร มีค่าความละเอียดในการวัดแรงประมาณ 0.122 นิวตัน มีค่าความละเอียดในการวัดโมเมนต์ประมาณ 0.005 นิวตันเมตร และจากการทดสอบวัดแรงและโมเมนต์ทุกชนิดพร้อม ๆ กันพบว่าค่าที่วัดได้ผิด

พลาดไปไม่เกิน 1.54 % พูลสเกล ซึ่งจะเห็นว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือพอสมควร

8.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะหรือแนวทางในการที่จะพัฒนาอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ควรปรับปรุงในส่วนของโต๊ะทดลองที่ใช้ปรับเทียบค่าให้มีมาตรฐานมากขึ้นและมีขนาดใหญ่กว่าเดิม ซึ่งจะทำให้ผลการปรับเทียบค่ามีความถูกต้องมากกว่าเดิม นั่นก็หมายถึงเวลานำไปวัดแรงและโมเมนต์จริงก็就会有ความถูกต้องมากขึ้น และจะทำให้สามารถทดลองใส่แรงและโมเมนต์ที่มีขนาดมาก ๆ ได้ด้วย

2. เนื่องจากสเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่มีความบอบบาง และมีอายุการใช้งานค่อนข้างจำกัดเมื่อนำไปใช้งานในภาวะปกติ ดังนั้นควรมีการออกแบบในส่วนของเขาซึ่งเพิ่มเติมและทำการอัดก๊าซเฉื่อยลงไปซึ่งจะทำให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

3. เพื่อให้สามารถนำไปใช้จริงได้นั้น จะต้องพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำค่าสัญญาณที่วัดจากสเตรนเกจมาประมวลผลแล้วส่งเข้าคอมพิวเตอร์ และในส่วนของซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่จะต้องทำการคำนวณแรงและโมเมนต์จากค่าสัญญาณที่วัดได้จากสเตรนเกจ

รายการอ้างอิง

- [1] Uchiyama, M., Bayo, E., and Palma-Villalon, E.. A Systematic Design Procedure to Minimize a Performance Index for Robot Force Sensors. ASME, 113 (Sep 1991) : 388-394.
- [2] Yoshikawa, T., and Miyazaki, T.. A Six-Axis Force Sensor with Three-Dimensional Cross-Shape Structure. IEEE, (1989) : 249-255.
- [3] Bayo, E., and Stubbe, J. R.. Six-Axis Force Sensor Evaluation and a New Type of Optimal Frame Truss Design for Robot Applications. Journal of Robotic Systems, 6 (1989) : 191-208.
- [4] Nakamura, Y., Yoshikawa, T., and Futamata, I.. Design and Signal Processing of Six-Axis Force Sensors. Preprints of the 4th International Symposium of Robotics Research (Aug 1987) : 75-81.
- [5] ไพศาล เต็งเจริญชัย. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [6] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [7] ศิริชัย พงษ์วิชัย. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

พลสิทธิ์ นนทลี. อุปกรณ์ตรวจจู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

Craig, J. J.. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 2nd edition. USA : Addison-
Wesley, 1989.

Perry, C. C., and Lissner, H. R.. The Strain Gage Primer. 2nd edition. USA : McGraw-Hill
Book, 1962.

Window, A. L., and Holister, G. S.. Strain Gauge Technology. Great Britain : Applied
Science Publishers, 1982.

Doebelin, E. O.. Measurement Systems Application and Design. 4th edition. Singapore :
McGraw-Hill, 1990.

Morris, I. S.. Principles of Measurement and Instrumentation. Great Britain : Prentice
Hall, 1988.

Klafter, R. D., and Chmielewski, T. A.. Robotic Engineering An Integrated Approach.
USA : Prentice Hall, 1989.

Koren, Y.. Robotics for Engineers. USA : McGraw-Hill, 1985.

Andeen, G. B.. Robot design Handbook. USA : McGraw-Hill, 1988.

Fu, K. S., Gonzalez, R. C., and Lee, C. S. G.. Robotics Control, Sensing, Vision, and
Intelligence. USA : McGraw-Hill, 1987.

Sciavicco, L., and Siciliano, B.. Modeling and Control of Robot Manipulators. USA :
McGraw-Hill, 1996.

Spong, M. W., and Vidyasagar, M.. Robot Dynamics and Control. USA : John Wiley &
Sons, 1989.



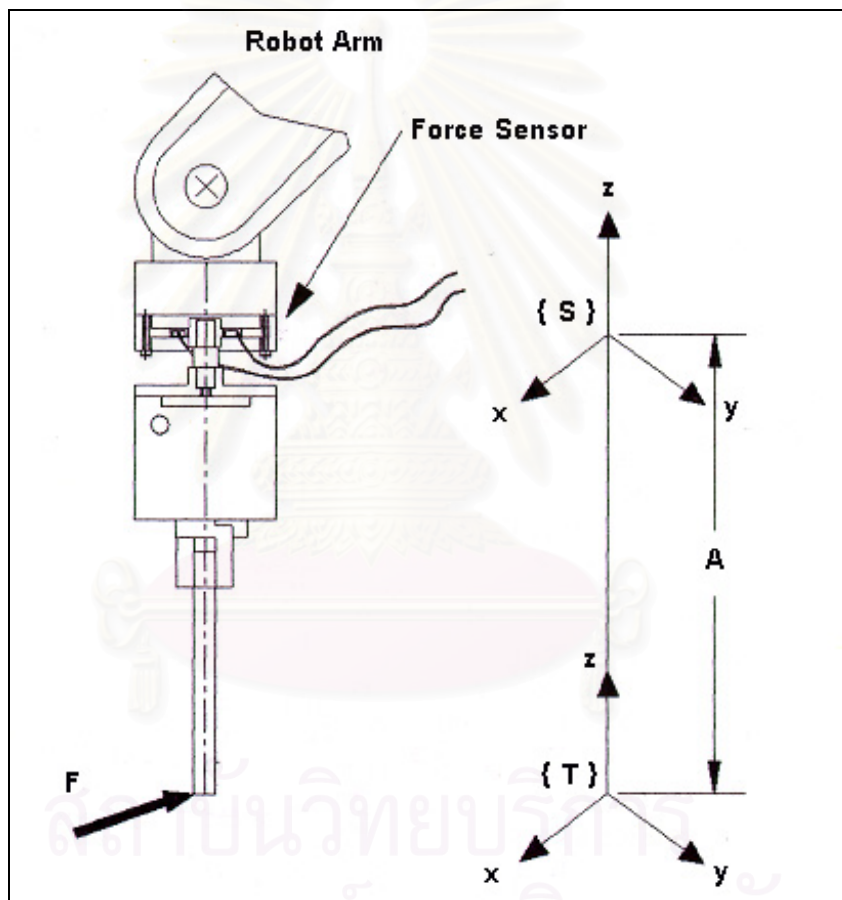
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การแปลงแรงและโมเมนต์ที่เซนเซอร์เฟรมเพื่อหาแรงและโมเมนต์ที่ทูลเฟรม

เนื่องจากขนาดของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งบริเวณ
ข้อมือของแขนกลจะเป็นค่าที่เทียบกับโคออร์ดิเนตของตัวอุปกรณ์ตรวจรู้แรงหรือที่เรียกว่า
เซนเซอร์เฟรม (sensor frame, {S}) ในขณะที่เราต้องการคือ ค่าของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่
ปลายของอุปกรณ์ทำงานที่สัมผัสกับชิ้นงาน โดยจะทำการตั้งโคออร์ดิเนตเพื่ออ้างอิงทิศทางที่
ตำแหน่งนี้ว่า ทูลเฟรม (tool frame, {T}) ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แสดงการกำหนดโคออร์ดิเนตเฟรมของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

ในการแปลงแรงที่เทียบกับกับเฟรม { S } ให้ไปเป็นแรงที่เทียบกับเฟรม { T } นั้นสามารถทำได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} {}^T F_T \\ {}^T N_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^T_S R & 0 \\ {}^T P_{\text{SORG}} \times {}^T_S R & {}^T_S R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S F_S \\ {}^S N_S \end{bmatrix} \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ ${}^T F_T, {}^S F_S$ คือ แรงเมื่อเทียบกับทูลเฟรมและเซนเซอร์เฟรมตามลำดับ

${}^T N_T, {}^S N_S$ คือ โมเมนต์เมื่อเทียบกับทูลเฟรมและเซนเซอร์เฟรมตามลำดับ

${}^T_S R$ คือ โรเทชันเมตริกซ์ (rotation matrix) ของเซนเซอร์เฟรมเมื่อเทียบกับทูลเฟรม

${}^T P_{\text{SORG}}$ คือ เวกเตอร์จุดกำเนิด (origin) ของเซนเซอร์เฟรมเมื่อเทียบกับทูลเฟรม

โดยที่ $P \times$ คือ cross product สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์โอเปอเรเตอร์ได้ดังนี้

$$P \times = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{ก.2})$$

สมการที่ (ก.1) เขียนได้ในรูปย่อดังนี้

$${}^T F_T = {}^T_S T_f {}^S F_S \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ ${}^T_S T_f$ ก็คือ ฟอर्स-โมเมนต์ทรานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (force-moment transformation matrix)

ซึ่งจากรูปที่ ก.1 จะสามารถแปลงแรงและโมเมนต์ที่เทียบกับเซนเซอร์เฟรมให้ไปเทียบกับทูลเฟรม ได้ดังนี้

เนื่องจาก

$${}^T_S R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^T P_{\text{SORG}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$${}^T P_{\text{SORG}} \times {}^T_S R = \begin{bmatrix} 0 & -A & 0 \\ A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -A & 0 \\ A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (ก.1) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{(T)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{(S)}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

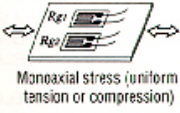
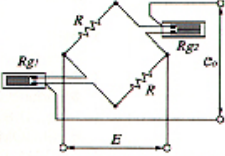
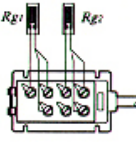
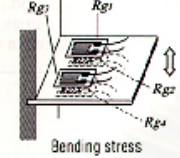
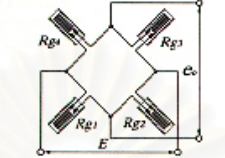
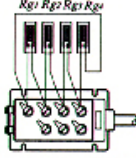
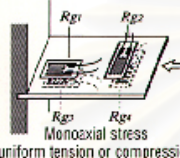
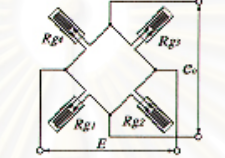
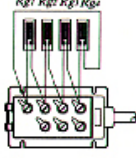
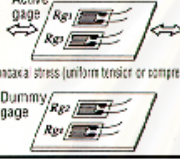
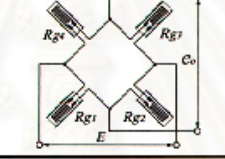
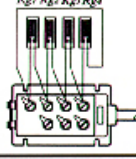

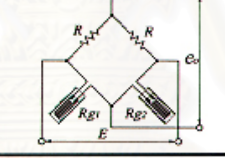
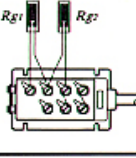
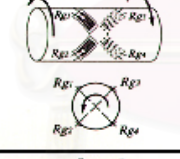
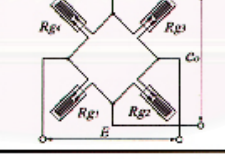
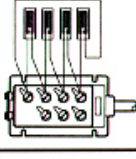
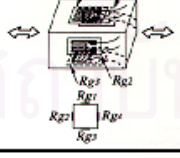
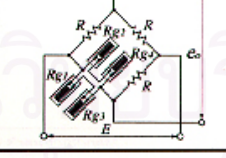
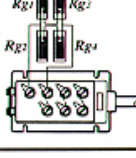
ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงวงจรวัดความเครียดและการใช้งาน

จากคู่มือประกอบอุปกรณ์วัดความเครียดแบบแกนเดี่ยวที่ 901D-U62 ของบริษัท Kyowa จำกัด

How to form strain gage bridges

Gage method Connection system	Application	Circuit	Output	Remarks	Bridge boxes DB-120P, 350P
1 1-active-gage 2-wire Nr. of gage: 1	 Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ K _s : Gage factor ε _o : Strain E : Bridge voltage e _o : Output voltage R _g : Gage resistor R : Fixed resistor	No temp. compensation; x1 output; non-linearly correction needed for large strain	
2 1-active-gage 3-wire Nr. of gage: 1	 Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$	No temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x1 output; non-linearly correction needed for large strain	
3 1-active-gage (2 in series) 2-wire (Cancelling bending strain) Nr. of gages: 2	 Bending Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain : ε ₁ R _{g2} Strain : ε ₂ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ R : Fixed resistor R _{g1} + R _{g2} = R	No temperature compensation; bending strain cancelled; x1 output	
4 1-active-gage (2 in series) 3-wire (cancelling bending strain) Nr. of gages: 2	 Bending Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain : ε ₁ R _{g2} Strain : ε ₂ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$ R : Fixed resistor R _{g1} + R _{g2} = R	No temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled; x1 output	
5 Active-dummy (2-gage method) Nr. of gages: 2	 Active gage Monoaxial stress (uniform tension or compression) Dummy gage		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ K _s : Gage factor ε _o : Strain E : Bridge voltage e _o : Output voltage R _{g1} : Strain : ε _o R _{g2} : Strain : 0 R : Fixed resistor	Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x1 output	
6 2-active-gage (at right angles) Nr. of gages: 2	 Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{(1 + \nu) E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ ν : Poisson's ratio R _{g1} , R _{g2} : Gage resistor R _{g1} Strain : ε _o R _{g2} Strain : -ν ε _o R : Fixed resistor	Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x(1+ν) output	
7 2-active-gage (cancelling bending strain) Nr. of gages: 2	 Bending stress		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain : ε _o R _{g2} Strain : -ε _o R : Fixed resistor	Temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; comp (tension) strain cancelled; x2 output	
8 Opposite 2-active-gage 2-wire Nr. of gages: 2	 Monoaxial stress (uniform tension or compression)		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain : ε _o R _{g2} Strain : ε _o R : Fixed resistor	No temp. compensation; bending strain cancelled by gages connected on front and back; non-linearly compensation needed for large strain; x2 output	

Gage method Connection system	Application	Circuit	Output	Remarks	Bridge boxes DB-120P, 350P
<p>9</p> <p>Opposite 2-active-gage 3-wire</p> <p>Nr. of gages: 2</p>	 <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ <p>Rg1 Strain: ϵ_o Rg2 Strain: ϵ_o R : Fixed resistor</p>	<p>No temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled (by gages cemented on front and back; x2 output; correction of non-linearity needed)</p>	
<p>10</p> <p>4-active-gage (bending strain measuring)</p> <p>Nr. of gages: 4</p>	 <p>Bending stress</p>		$e_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$ <p>Rg1, Rg2 Bending strain: ϵ_o Rg3, Rg4 Strain cancelled; x4 output Bending strain: $-\epsilon_o$</p>	<p>Temp. compensation; thermal effect on leadwires cancelled; compression (tension) strain cancelled; x4 output</p>	
<p>11</p> <p>4-active-gage (gages at right angles)</p> <p>Nr. of gages: 4</p>	 <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$e_o = \frac{(1 + \nu) E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ <p>ν : Poisson's ration Rg1, Rg3 Strain: ϵ_o Rg2, Rg4 Strain: $-\epsilon_o$</p>	<p>Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x2(1-ν) output</p>	
<p>12</p> <p>Active-dummy (4-gage method)</p> <p>Nr. of gages: 4</p>	 <p>Monoaxial stress (uniform tension or compression)</p>		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ <p>Rg1, Rg3 Strain: ϵ_o Rg2, Rg4 Strain: 0</p>	<p>Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled by gages cemented on front and back; x2 output</p>	
<p>13</p> <p>2-Active-dummy (twisting strain measuring)</p> <p>Nr. of gages: 2</p>			$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ <p>Rg1 Twisting strain: ϵ_o Rg2 Twisting strain: $-\epsilon_o$ R : Fixed resistor</p>	<p>Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; x2 output</p>	
<p>14</p> <p>4-active-gage (twisting strain measuring)</p> <p>Nr. of gages: 4</p>			$e_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$ <p>Rg1, Rg3 Twisting strain: ϵ_o Rg2, Rg4 Twisting strain: $-\epsilon_o$</p>	<p>Temperature compensation; thermal effect on leadwires cancelled; bending strain cancelled; x4 output</p>	
<p>15</p> <p>4-active-gage (mean strain measuring)</p> <p>Nr. of gages: 4</p>			$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4}{4}$ <p>R : Fixed resistor R = Rg1 = Rg2 = Rg3 = Rg4</p>	<p>No Temp. compensation; mean stress measuring; x1 output; correction non-linearity needed for large strain</p>	

●Relation between strain and voltage

The output of a strain gage bridge is expressed by a strain quantity ($\times 10^{-6}$ strain) or by an output voltage (mV/V or μ V/V) against a bridge voltage. The relation between the two is expressed by the formula below.

$$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$$

Now, suppose that Bridge voltage (E) = 1V and Gage factor (Ks) = 2.00

The following then holds.

$$2e_o = \epsilon_o$$

This means that strain output is always 2 times larger than a bridge's output voltage.

Example: 3000×10^{-6} strain $\rightarrow 1500 \mu$ V/V = 1.5mV/V

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณ

ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการนอร์มอลไลซ์เมตริกซ์ C_s โดยจะคำนวณตามสมการที่ (3.6) และ (3.8) สมมติว่าให้ C_s มีค่าดังนี้ (ดูบทที่ 5 หน้า 36)

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & -1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & -174.743 & 0 \\ 1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 174.743 & 0 & 0 \\ 0 & 1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & 174.743 & 0 \\ -1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & -174.743 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นถ้าเรากำหนดให้ F_{std} มีค่า = 1 ดังนั้นตามสมการที่ (3.8) ค่า M_{std} ควรมีค่าดังนี้

$$M_{std} = \frac{|1.313 \times 2| + |2.095 \times 4| + |-1.313 \times 2|}{|174.743 \times 2| + |-174.743 \times 2| + |-56.475 \times 4|} = 0.0147$$

จากสมการที่ (3.6) จะได้ค่า \bar{C}_s ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & -1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & -174.743 & 0 \\ 1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 174.743 & 0 & 0 \\ 0 & 1.313 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & 174.743 & 0 \\ -1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -56.475 \\ 0 & 0 & 2.095 & -174.743 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0147 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0147 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0147 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & -1.313 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & -2.576 & 0 \\ 1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 2.576 & 0 & 0 \\ 0 & 1.313 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & 0 & 2.576 & 0 \\ -1.313 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.832 \\ 0 & 0 & 2.095 & -2.576 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายตรีวิทย์ วงศ์ภักดิ์วัฒนกุล เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2521 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย