การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด

นาย ไพศาล เด็งเจริญชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-299-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 18970375

Finite Element Analysis for a Force-Torque Sensor

MR. PHAISAL TENGCHAROENCHAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1998

ISBN 974-331-299-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด
โดย	นาย ไพศาล เต็งเจริญชัย
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

ไพศาล เต็งเจริญชัย : การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด (Finite Element Analysis for a Force-Torque Sensor)
อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 120 หน้า. ISBN 974-331-299-4.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ช่วยในการออกแบบก็คือโปรแกรม CATIA with module ANELFINI (Finite Element Module) เป้าหมายในการออกแบบคือการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด (Sensor I) ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลังจากที่หาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องได้แล้ว จึงได้ทำการปรับปรุงอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิม (Sensor I) จนได้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดใหม่ (Sensor II) ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกพิสูจน์ยืนยันด้วยการทดลองจริง

ดัชนีที่ใช้ในการเปรียบเทียบว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดดีอย่างไรมีอยู่ 2 ตัวคือ strain sensitivity และ condition number จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Sensor II สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบด้วย strain sensitivity พบว่า สำหรับแรงในแนวแกน x, y และ z ดีขึ้น 201.571%, 203.209% และ 15.464% ตามลำดับ สำหรับโมเมนต์ในแนวแกน x และ y ดีขึ้น 19.012% และ 17.948% ตามลำดับเช่นเดียวกัน แต่สำหรับโมเมนต์ในแนวแกน z แย่ลง 31.275% ส่วนการเปรียบเทียบด้วยค่า condition number ปรากฏว่า Sensor II มีค่าเท่ากับ 425.74 ซึ่งดีกว่า Sensor I ที่มีค่าเท่ากับ 815.46 จากดัชนีทั้ง 2 ตัวที่ใช้ในการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ว่า Sensor II มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่า Sensor I จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยจะทำให้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่ดีขึ้นได้

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	**ลายมือชื่อนิสิต** ไพศาล เต็งเจริญชัย
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2541	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

c816185 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: FINITE ELEMENT ANALYSIS / FORCE / TORQUE / SENSOR
PHAISAL TENGCHAROENCHAI : FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR A FORCE-TORQUE SENSOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D. 120 pp. ISBN 974-331-299-4

This thesis is the study of using finite element method to design strain-gage-type force-torque sensors. The CATIA with ANELFINI (Finite Element Module) is used for the study. The objective is to improve the sensor (Sensor I) performance developed by the Robotic Lab at Chulalongkorn University. The proper finite element model with reasonable boundary conditions is obtained. With the finite element models, Sensor I is modified to obtain the new sensor (Sensor II) with better performance. The result from the analysis is verified with the experiment.

Indices used to compare how well the force-torque sensors are the strain sensitivity and the condition number. The experiment shows that Sensor II has better performance. When they were compared by the strain sensitivity : for force along X-axis, Y-axis and Z-axis increase 201.571%, 203.209% and 15.464% respectively, for the moment along X-axis and Y-axis increase 19.012% and 17.948% as well, but the moment along Z-axis decrease 31.275%. The condition number is also improved from 815.46 for Sensor I to 425.74 for Sensor II. From the both indices, it can be concluded that Sensor II has better performance than Sensor I. With the help of finite element analysis, the time used for the design and analysis to obtain the better strain-gage-type force-torque sensors can be reduced.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต ไพศาล เท็งเจริญชัย
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ศ. ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่ท่านได้สละเวลาให้คำแนะนำปรึกษาปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำงาน ได้หาข้อมูลให้ในบางส่วน

ขอขอบคุณ พี่ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ พี่วิโรจน์ ลิ่มตระการ คุณภาษิต อนุกุลอนันต์ชัย คุณสมบูรณ์ อนันตธนะสาร คุณสรรวริศ อุ่ยวัฒนา คุณพลังรัฐ ธนการพาณิช และ คุณโอภาส จิระวิณิจ ที่เป็นที่ปรึกษาปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น พี่ประภณ นิลพันธ์พิทักษ์ คุณเกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย คุณบวร ปัญญาวรวัจน์ คุณปัญญา ดีประเสริฐกุล คุณเพิ่มศักดิ์ สุขศิริ คุณมงคล เทียนวิบูลย์ คุณณัฐดนัย ตันฑวิรุฬห์ คุณประสาทพร พูลสมบัติ และน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานและให้กำลังใจ

ขอขอบคุณบริษัท NSS จำกัด และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอมอบกตัญญุตาบูชาแด่ บิดา มารดา ซึ่งคอยสนับสนุนในด้านต่างๆจนเล่าเรียนได้สำเร็จ ขอกราบขอบคุณ ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาเพื่อเป็นพื้นฐานในการเล่าเรียนจนสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. อุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและแรงบิด..... 3

3. การออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด..... 13

4. การพิจารณาแรงและโมเมนต์ในทิศทางต่าง ๆที่กระทำต่ออุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดด้วยทฤษฎีของคาน..... 18

5. ผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Sensor I)..... 30

6. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 53

7. การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 63

8. ผลการทดลองของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II).. 85

9. การวิเคราะห์ผล..... 107

10. สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... 111

รายการอ้างอิง 112

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การกำจัดสัญญาณรบกวนในการวัดค่าความเครียด..... 113

ประวัติผู้เขียน 120

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเครียดที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีของคาน..... 28

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิม (Sensor I)
ตารางที่ 5.1 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน x..... 30
ตารางที่ 5.2 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน y 34
ตารางที่ 5.3 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน z 38
ตารางที่ 5.4 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน x..... 42
ตารางที่ 5.5 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน y 45
ตารางที่ 5.6 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน z..... 48
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ได้จากการทดลองจริงและที่ได้จาก
ทฤษฎีของคานของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิม (Sensor I)..... 51

ตารางที่ 7.1 แสดงผลของ Sensor I ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 71
ตารางที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียด ณ. ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลัก
ในการวัดระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor I ... 72
ตาราง 7.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของวงแหวนนอก..... 73
ตารางที่ 7.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง..... 74
ตารางที่ 7.5 แสดงผลของการใส่ Slot ขนาดความยาว 5 mm. เมื่อมีแรง Fx มากระทำ..... 75
ตาราง 7.6 แสดงผลการเปลี่ยนความยาวของ Slot ต่อ Fx..... 76
ตาราง 7.7 แสดงผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor II..... 83

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II)
ตารางที่ 8.1 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน x..... 85
ตารางที่ 8.2 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน y 89
ตารางที่ 8.3 การปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน z 93
ตารางที่ 8.4 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน x..... 97
ตารางที่ 8.5 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน y 100
ตารางที่ 8.6 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน z..... 103

หน้า

ตารางที่ 9.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจริง ของ Sensor II..... 107
ตารางที่ 9.2 แสดงผลเปรียบเทียบด้วยค่า strain sensitivity ระหว่าง Sensor I และ Sensor II ทั้งจากการวัดจริงและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 108
ตารางที่ 9.3 แสดงค่า condition number ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจริง ของทั้ง Sensor I และ Sensor II..... 109
ตารางที่ 9.4 แสดงข้อมูลของ Sensor I และ Sensor II..... 109

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการใช้งาน force-torque sensor ในงานขัดผิววัตถุ..... 3
รูปที่ 2.2 แสดงพิกัดของเครื่องมือและพิกัดที่ข้อมือของแขนกล..... 4
รูปที่ 2.3 แสดงระบบการควบคุมแรงอย่างง่าย ๆ..... 4
รูปที่ 2.4 แสดงภาพลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจ..... 6
รูปที่ 2.5 วงจร wheat stone แบบ half bridge ที่ใช้ในการวัดความเครียด..... 6
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของชุดประกอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด..... 8
รูปที่ 2.7 แสดงภาพมุมมองด้านบนของโต๊ะทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด..... 8
รูปที่ 2.8 ภาพด้านข้างของโต๊ะทดสอบแสดงวิธีการออกแรงกระทำในทิศทางต่าง ๆ..... 9
รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการออกแรงกระทำในแนวแกน x, y 9
รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการออกแรงกระทำในแนวแกน –z..... 10
รูปที่ 2.11 แสดงการออกแรงกระทำในแนวแกน +z..... 10
รูปที่ 2.12 แสดงการสร้างโมเมนต์ในแนวแกน x, y 11
รูปที่ 2.13 แสดงการสร้างโมเมนต์ในแนวแกน z..... 11
รูปที่ 2.14 แสดงขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Sensor I)..... 12
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดในสภาพปกติ..... 18
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการเสียรูป เมื่อมี Fx มากระทำ..... 18
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการโก่งงอของแกน B และ D เมื่อมี Fx มากระทำ..... 19
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดเมื่อมี Fz มากระทำ..... 21
รูปที่ 4.5แสดงลักษณะการโก่งงอของแกนเมื่อมี Fz มากระทำ..... 22
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด เมื่อมี Mx มากระทำ..... 23
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะที่แกนต่าง ๆเมื่อมี Mx มากระทำ..... 23
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการโก่งงอของแกน เมื่อมี Mx มากระทำ..... 23
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด เมื่อมี Mz มากระทำ..... 26
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการโก่งงอของคานเมื่อมี Mz มากระทำ..... 26

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิม (Sensor I)

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_1 31
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_2 31
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_3 31

หน้า

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_4 32
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_5 32
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับค่าความเครียด ε_6 32
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_7 33
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_8 33
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_1 35
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_2 35
รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_3 35
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_4 36
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_5 36
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_6 36
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_7 37
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_8 37
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_1 39
รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_2 39
รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_3 39
รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_4 40
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_5 40
รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_6 40
รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_7 41
รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_8 41
รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_1 42
รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_2 42
รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_3 43
รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_4 43
รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_5 43
รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_6 44
รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_7 44
รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_8 44
รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_1 45
รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_2 45
รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_3 46

หน้า

รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_4 46
รูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_5 46
รูปที่ 5.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_6 47
รูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_7 47
รูปที่ 5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_8 47
รูปที่ 5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_1 48
รูปที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_2 48
รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_3 49
รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_4 49
รูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_5 49
รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_6 50
รูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_7 50
รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_8 50

รูปที่ 6.1 แสดงภาพของวัตถุที่ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆและแสดงผลของการวิเคราะห์ความเค้นในลักษณะของสีที่แตกต่างกัน..... 54
รูปที่ 6.2 แผ่นเรียบที่อยู่ภายใต้แรงดึง..... 54
รูปที่ 6.3 แผ่นเรียบที่ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ๆ..... 55
รูปที่ 7.1 แสดงรูปแบบจำลองของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด..... 63
รูปที่ 7.2 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีแรงในแนวแกน x มากระทำ..... 63
รูปที่ 7.3 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีแรงในแนวแกน z มากระทำ..... 64
รูปที่ 7.4 แสดงรูปแบบจำลองที่ถูกแบ่งส่วนแล้ว เมื่อมีแรงในแนวแกน z มากระทำ..... 64
รูปที่ 7.5 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน x มากระทำ..... 65
รูปที่ 7.6 แสดงรูปแบบจำลองที่ถูกแบ่งส่วนแล้ว เมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน x มากระทำ..... 65
รูปที่ 7.7 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน z มากระทำ..... 66
รูปที่ 7.8 การเสียรูปเนื่องจาก Fx หรือ Fy ของ Sensor I, top view..... 67
รูปที่ 7.9 การเสียรูปเนื่องจาก Fx หรือ Fy ของ Sensor I, isometric view..... 67
รูปที่ 7.10 การเสียรูปเนื่องจาก Fz ของ Sensor I, isometric view..... 67
รูปที่ 7.11 การเสียรูปเนื่องจาก Fz ของ Sensor I, side view..... 68
รูปที่ 7.12 การเสียรูปเนื่องจาก Mx หรือ My ของ Sensor I, isometric view..... 68
รูปที่ 7.13 การเสียรูปเนื่องจาก Mx หรือ My ของ Sensor I, side view..... 68

หน้า

รูปที่ 7.14 การเสียรูปเนื่องจาก Mz ของ Sensor I, top view..... 69
รูปที่ 7.15 การเสียรูปเนื่องจาก Mz ของ Sensor I, isometric view..... 69
รูปที่ 7.16 แสดงภาพ meshed medel ของ SensorI : Fx 10096 nodes 42113 elements 69
รูปที่ 7.17 แสดงภาพ meshed model ของ SensorI : Fz 21493 nodes 95178 elements 70
รูปที่ 7.18 แสดงภาพ meshed model ของ SensorI : Mx 42441 nodes 195837 elements70
รูปที่ 7.19 แสดงภาพ meshed model ของ SensorI : Mz 57233 nodes 281739 elements70
รูปที่ 7.20 แสดงรูปจริงของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II).... 77
รูปที่ 7.21 แสดงรูปของ Sensor II เมื่อติดสเตรนเกจแล้ว..... 77
รูปที่ 7.22 แสดงขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II)..... 78
รูปที่ 7.23 การเสียรูปเนื่องจาก Fx หรือ Fy ของ Sensor II, top view..... 79
รูปที่ 7.24 การเสียรูปเนื่องจาก Fx หรือ Fy ของ Sensor II, isometric view..... 79
รูปที่ 7.25 การเสียรูปเนื่องจาก Fz ของ Sensor II, isometric view..... 79
รูปที่ 7.26 การเสียรูปเนื่องจาก Fz ของ Sensor II, side view..... 80
รูปที่ 7.27 การเสียรูปเนื่องจาก Mx หรือ My ของ Sensor II, isometric view..... 80
รูปที่ 7.28 การเสียรูปเนื่องจาก Mx หรือ My ของ Sensor II, side view..... 80
รูปที่ 7.29 การเสียรูปเนื่องจาก Mz ของ Sensor II, top view..... 81
รูปที่ 7.30 การเสียรูปเนื่องจาก Mz ของ Sensor II, isometric view..... 81
รูปที่ 7.31 แสดงภาพ meshed medel ของ SensorII : Fx 7346 nodes 27704 elements 81
รูปที่ 7.32 แสดงภาพ meshed medel ของ SensorII : Fz 22722 nodes107736 elements82
รูปที่ 7.33 แสดงภาพ meshed medel ของ SensorII : Mx 47291 nodes228384 elements82
รูปที่ 7.34 แสดงภาพ meshed medel ของ SensorII : Mz 71329 nodes333559 elements82

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II)
รูปที่ 8.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_1 86
รูปที่ 8.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_2 86
รูปที่ 8.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_3 86
รูปที่ 8.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_4 87
รูปที่ 8.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_5 87
รูปที่ 8.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับค่าความเครียด ε_6 87
รูปที่ 8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_7 88

หน้า

รูปที่ 8.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fx กับ ค่าความเครียด ε_8 88
รูปที่ 8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_1 90
รูปที่ 8.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_2 90
รูปที่ 8.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_3 90
รูปที่ 8.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_4 91
รูปที่ 8.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_5 91
รูปที่ 8.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_6 91
รูปที่ 8.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_7 92
รูปที่ 8.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fy กับ ค่าความเครียด ε_8 92
รูปที่ 8.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_1 94
รูปที่ 8.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_2 94
รูปที่ 8.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_3 94
รูปที่ 8.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_4 95
รูปที่ 8.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_5 95
รูปที่ 8.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_6 95
รูปที่ 8.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_7 96
รูปที่ 8.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fz กับ ค่าความเครียด ε_8 96
รูปที่ 8.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_1 97
รูปที่ 8.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_2 97
รูปที่ 8.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_3 98
รูปที่ 8.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_4 98
รูปที่ 8.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_5 98
รูปที่ 8.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_6 99
รูปที่ 8.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_7 99
รูปที่ 8.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mx กับ ค่าความเครียด ε_8 99
รูปที่ 8.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_1 100
รูปที่ 8.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_2 100
รูปที่ 8.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_3 101
รูปที่ 8.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_4 101
รูปที่ 8.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_5 101
รูปที่ 8.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_6 102
รูปที่ 8.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_7 102

หน้า

รูปที่ 8.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง My กับ ค่าความเครียด ε_8 102
รูปที่ 8.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_1 103
รูปที่ 8.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_2 103
รูปที่ 8.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_3 104
รูปที่ 8.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_4 104
รูปที่ 8.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_5 104
รูปที่ 8.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_6 105
รูปที่ 8.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_7 105
รูปที่ 8.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mz กับ ค่าความเครียด ε_8 105

รูป ก การเกิด electrostatic noise..... 114
รูป ข การเกิด electromagnetic noise..... 114
รูป ค Electrostatic shielding..... 115
รูป ง Noise cancellation by amplifier common mode rejection..... 116
รูป จ Gage selection and wiring technique..... 116
รูป ฉ Cables comparison..... 117
รูป ช การกำจัดสายส่วนเกิน..... 117
รูป ซ Woven cable to reduce severe electromagnetic radiation and pickup..... 119