17

อุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล

นาย พลสิทธิ์ นนทลี

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พุทธศักราช 2538

ISBN 974-632-538-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16732947

FORCE SENSOR FOR CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR

MR. PONLASIT NONDHALEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHULALONGKORN UNIVERSITY
1995

ISBN 974-632-538-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล
โดย นาย พลสิทธิ์ นนทลี
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

Santi Thoongsuwan
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พลสิทธิ์ นนทลี : อุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล (FORCE SENSOR FOR CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 141 หน้า. ISBN 974-632-538-8

งานวิจัยเรื่องอุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล จะเป็นการวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบสร้างและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ตรวจวัดแรง โดยในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแรง จะใช้หลักการการเกิดความเครียดของโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแรง ที่จะสัมพันธ์กับแรงและโมเมนต์ที่มากระทำในทิศทางต่างๆ ซึ่งค่าความเครียดจะถูกวัดโดยสเตรนเกจที่ติดตั้งที่โครงสร้างในทิศทางต่างๆกัน เพื่อให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดเนื่องจากแรงได้ทุกทิศทาง และจากการปรับเทียบค่าพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ได้มีความสามารถในการวัดแรงได้ 4 ส่วนประกอบของแรง คือ แรงในแนวแกน Z โมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z และในการปรับเทียบค่าจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรง [F] กับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า [W] ที่วัดได้จากชุดขยายสัญญาณของสเตรนเกจ ในรูปของเมตริกซ์ปรับเทียบค่า [Rf] ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวนหาค่าแรง [F] จากค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า [W] ที่วัดได้

สำหรับในการทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดแรง จะทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น การหาค่าความละเอียด (Resolution) ในการวัดแรง การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ค่าการทำซ้ำ (Repeatability) ค่าฮีสเตอเรซิส (Hysteresis) และการทดสอบแรงและความผิดพลาดในการวัด ซึ่งจากผลการปรับเทียบค่า อุปกรณ์ตรวจวัดแรง สามารถวัดแรงในแนวแกน Z ระหว่าง -44.8 ถึง 55.5 นิวตัน ด้วยค่าความละเอียด 0.12 นิวตัน ช่วงในการวัดโมเมนต์ในแนวแกน X และแกน Y เท่ากับ -2.4 นิวตันเมตร ถึง 2.4 นิวตันเมตร มีค่าความละเอียด 0.001 นิวตันเมตร และช่วงในการวัดโมเมนต์ในแนวแกน Z เท่ากับ -3.4 นิวตันเมตร ถึง 3.4 นิวตัน-เมตร ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.002 นิวตันเมตร ผลการทดสอบคุณสมบัติ มีค่าความแม่นยำดีกว่า 5.6% ค่าความเป็นเชิงเส้นดีกว่า 3.3% ค่าการทำซ้ำดีกว่า 3.7% และความผิดพลาดในการวัดต่ำกว่า 5.5% (เนื่องจากผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ต่อการวัดแรงในแนวแกน Z) ส่วนค่าฮีสเตอเรซิสมีค่าต่ำมาก ซึ่งจากผลการทดสอบต่างๆเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือพอเพียงสำหรับนำไปใช้ในงานควบคุมต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C516017 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: FORCE/SENSOR/CONTROL/MANIPULATOR

PONLASIT NONDHALEE : FORCE SENSOR FOR CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. VIBOON SANGVEERAPHUNSIRI, 141 PP.

ISBN 974-632-538-8

This thesis concerns with the design, calibration and also evaluated the specification of the force sensor. For design process, the force sensor should have a structure that can be strained relating to force independently and linearly in any direction. The strain shall be measured by a strain gauge which attached to the structure perpendicular to the direction of the force. For calibration, the force sensor can measure force in four components; force in Z direction, moment in X Y and Z direction. After that, the calibration matrix [Rf] can be built up by the relation of known forces [F] and values of output voltage from strain amplifiers [W]. From this calibration matrix, force can be found by the product of the matrix [Rf] and the matrix [W] which can be read from the strain amplifier directly.

For specification test, accuracy, repeatability, linearity, resolution, hysteresis and effect of force and error in other directions are tested. The result of the tests show that the force sensor can detect force in Z direction (ranging between -44.8 N and 56.8 N) with a resolution of 0.12 N, moment in X and Y direction (ranging between -2.4 Nm and 2.4 Nm) with a resolution of 0.001 Nm, and moment in Z direction (ranging between -3.5 Nm and 3.5 Nm) with a resolution of 0.002 Nm. Accuracy, linearity, repeatability, is less than 5.6%, 3.3%, 3.7% respectively. Hysteresis is also very low. The error of moment Mz that effecting the force Fz is also less than 5.5%. The test shown that the force sensor is accurate enough for control application.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ที่ท่านได้สละเวลาให้คำแนะนำปรึกษา และให้ข้อคิดต่างๆเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณ นายเสกสรรค์ สีพา เจ้าหน้าที่ของสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำการวิจัย และเนื่องจากทุนในการทำการวิจัยบางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆสิ่ง พร้อมทั้งให้กำลังใจมาโดยตลอด

นาย พลสิทธิ์ นนทลี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญตาราง.....ช

สารบัญภาพ.....ญ

บทที่

1. บทนำ.....1

2. อุปกรณ์ในการตรวจวัดแรง.....4

3 การวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ.....17

4. การวิเคราะห์การเกิดความเครียดโดยวิธีการ ไฟไนท์เอลิเมนต์โปรแกรม.....25

5. อุปกรณ์วัดแรงและการตรวจวัดค่า.....35

6. การทดลอง.....42

7. ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....51

8. สรุปและข้อเสนอแนะ.....100

รายการอ้างอิง.....103

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.....105

ภาคผนวก ข.....113

ภาคผนวก ค.....116

ภาคผนวก ง.....118

ภาคผนวก จ.....122

ภาคผนวก ฉ.....126

ภาคผนวก ช.....134

ประวัติผู้เขียน.....141

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้าที่

7.1 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน X ด้านลบ.....50
7.2 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน X ด้านบวก.....50
7.3 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Y ด้านลบ.....52
7.4 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Y ด้านบวก.....52
7.5 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Z ด้านลบ.....53
7.6 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Z ด้านบวก.....53
7.7 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน X ด้านลบ.....54
7.8 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน X ด้านบวก.....54
7.9 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y ด้านลบ.....55
7.10 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y ด้านบวก.....55
7.11 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านลบ.....56
7.12 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านบวก.....56
7.13 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน X 57
7.14 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน Y 58
7.15 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน Z 59
7.16 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในแนวแกน X 60
7.17 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในแนวแกน Y 61
7.18 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในแนวแกน Z 62
7.19 แสดงผลการทดสอบแอคเคอเรซี่ 73
7.20 แสดงผลการทดสอบรีพีทอะบิลิตี้ 76
ฉ.1 แสดงผลของแรงในแนวแกน X ด้านลบ 126
ฉ.2 แสดงผลของแรงในแนวแกน X ด้านบวก 127
ฉ.3 แสดงผลของแรงในแนวแกน Y ด้านลบ 128
ฉ.4 แสดงผลของแรงในแนวแกน Y ด้านบวก 129
ฉ.5 แสดงผลของแรงในแนวแกน Z ด้านลบ 130

ฉ.6 แสดงผลของแรงในแนวแกน Z ด้านบวก 131
ฉ.7 แสดงผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านลบ 132
ฉ.8 แสดงผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านบวก 133

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้าที่

2.1 แผนภาพการควบคุมแรง....4
2.2 แผนภาพการควบคุมแบบไฮบริด....5
2.3 ลักษณะอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเทกซ์ไทล์....6
2.4 อุปกรณ์วัดแรงแบบโฟโต้ดีเทกเตอร์เทกซ์ไทล์เซนเซอร์....7
2.5 อุปกรณ์วัดแรงแบบคอนดักทีฟอีลาสโตเมอร์เซนเซอร์....8
2.6 อุปกรณ์วัดแรงแบบโพลีเมอร์เทกซ์ไทล์เซนเซอร์....9
2.7 อุปกรณ์วัดแรงแบบออพติคัลเทกซ์ไทล์เซนเซอร์....10
2..8 รีโมตเซนเตอร์คอมไพล์แอนซ์....11
2..9 อุปกรณ์วัดแรงไฮทีแฮนด์เอกเพิร์ทวัน....12
2.10 อุปกรณ์วัดแรงแบบซิกคอมโพเนนท์....13
2.11 อุปกรณ์วัดแรงแบบ The SRI-NASA
Ames force-torque sensor....14
2.12 อุปกรณ์วัดแรงแบบ Coiffet (Bejczy's sensitive wrist)....15
3.1 สเตรนเกจ....17
3.2 วงจรวีทสโตนบริดจ์....18
3.3 การคิดตั้งสเตรนเกจอัตราขยายสองเท่า....20
3.4 วงจรการปรับสมดุลย์วงจรบริดจ์....22
3.5 วงจรขยายพื้นฐานออปแอมป์....22
3.6 วงจรอินสตรูเมนต์แอมปลิไฟเออร์....23
3.7 แสดงคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณความถี่สูง....24
4.1 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรง....25
4.2 มิติของอุปกรณ์วัดแรง....26
4.3 แบบในการวิเคราะห์ผลของแรงในแนวแกน X และแกน Y....27
4.4 แบบในการวิเคราะห์ผลของแรงในแนวแกน Z....28
4.5 แบบในการวิเคราะห์ผลของโมเมนต์ในแนวแกน X และแกน Y....28

4.6 แบบในการวิเคราะห์ผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z 29
4.7 ผลการวิเคราะห์แรงในแนวแกน X หรือ Y ขนาด 10 นิวตัน.....30
4.8 ผลการวิเคราะห์แรงในแนวแกน X หรือ Y ขนาด 20 นิวตัน.....30
4.9 ผลการวิเคราะห์แรงในแนวแกน Z ขนาด 20 นิวตัน.....31
4.10 ผลการวิเคราะห์แรงในแนวแกน Z ขนาด 30 นิวตัน.....31
4.11 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ในแนวแกน X หรือ Y ขนาด 0.88 นิวตันเมตร.....32
4.12 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ในแนวแกน X หรือ Y ขนาด 2.2 นิวตันเมตร.....32
4.13 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ในแนวแกน Z ขนาด 1.32 นิวตันเมตร.....33
4.14 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ในแนวแกน Z ขนาด 2.64 นิวตันเมตร.....33
5.1 อุปกรณ์วัดแรงและการติดตั้งสเตรนเกจ.....33
5.2 การติดตั้งแบบฮาล์ฟบริดจ์.....35
5.3 วงจรการอ่านค่าสัญญาณ.....39
5.4 แผนภาพขั้นตอนการอ่านค่าสัญญาน.....39
5.5 วงจรการอ่านค่าและปรับสมดุลย์.....40
5.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการปรับสมดุลย์ของวงจรบริดจ์.....41
6.1 ชุดโต๊ะเครื่องมือในการปรับเทียบค่า.....47
6.2 อุปกรณ์วัดแรง.....47
6.3 ภาพประกอบอุปกรณ์วัดแรง.....48
6.4 การปรับเทียบค่าแรง F_X และ F_Y 48
6.5 การปรับเทียบค่าแรง F_Z 49
6.6 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ M_X และ M_Y 50
6.7 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ M_Z 50
7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_2 63
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_4 63
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6 64
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_8 64
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_X กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_3 65
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_X กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_4 65
7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_X กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_5 66
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_X กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_7 66

7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_X กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_8 67
7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_1 67
7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_2 68
7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_3 68
7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6 69
7.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_7 69
7.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_1 70
7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_3 70
7.17 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_5 71
7.18 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6 71
7.19 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_7 72
7.20 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_Z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_8 72
7.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน X 78
7.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน Y 78
7.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน Z ด้านลบ.....79
7.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน Z ด้านบวก.....79
7.25 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กระทำจริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ในแนวแกน Z 80
7.26 รีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน X ที่แรง -9.16 และ 9.16 นิวตัน.....81
7.27 รีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน Y ที่แรง -9.16 และ 9.16 นิวตัน.....81
7.28 รีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน Z ที่แรง -13.62 และ 30.09 นิวตัน.....82
7.29 รีพีทอะบิลิตี้ในแนวแกน Z ที่โมเมนต์ -1.498 และ 1.498 นิวตันเมตร.....82
7.30 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน X ที่แรง -4.73,-9.18
และ -15.87 นิวตัน..... 83
7.31 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน X ด้านลบ.....83
7.32 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน X ที่แรง 15.87, 9.18
และ 4.73 นิวตัน.....84
7.33 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน X ด้านบวก.....84
7.34 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Y ที่แรง -15.87, -9.18
และ -4.73 นิวตัน.....85
7.35 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน Y ด้านลบ.....85

7.36 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Y ที่แรง15.87, 9.18
และ 4.73 นิวตัน....86
7.37 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน Y ด้านบวก....86
7.38 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Z ที่แรง -35.93, -18.09 นิวตัน....87
7.39 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน Z ด้านลบ....87
7.40 ผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Z ที่แรง 35.93, 18.09 นิวตัน....88
7.41 โมเมนต์ M_Z เนื่องจากผลของแรงในแนวแกน Z ด้านบวก....88
7.42 ผลการวัดโมเมนต์ในแนวแกน Z ที่โมเมนต์ -1.99, -1.01 นิวตัน....89
7.43 แรง F_X ,F_Y และ F_Z เนื่องจากผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านลบ....89
7.44 ผลการวัดโมเมนต์ในแนวแกน Z ที่โมเมนต์ 1.99, 1.01 นิวตัน....90
7.45 แรง F_X ,F_Y และ F_Z เนื่องจากผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านบวก....90
ก.1 Time Domain Graph of Noisy Sine Wave 106
ก.2 Time Domain Graph of Interfering Noise 107
ก.3 การชีลด์ 110
ก.4 การเกิดกราวด์ลูปและการแก้ไข 110
ก.5 การใช้การ์ด....111
ก.6 ออพติคัลไอโซเลชั่น....112
ข.1 Least square fit 114
ค.1 แผนภาพการควบคุมแบบไฮบริด 117
ง.1 ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนกลับ....118
ง.2 การอินทีเกรตแบบดีสครีต 119
ง.3 การดิฟเฟอร์เรนชิเอตแบบดีสครีต 120
จ.1 การกำหนดโคออร์ดิเนตเฟรมของอุปกรณ์วัดแรง 122
จ.2 การแปลงแรงจากโคออร์ดิเนต {i} ไปที่ {i+1}....123
ช.1 ชุดวงจรบริดจ์....134
ช.2 วงจรขยายสัญญาณ....135
ช.3 วงจรเพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์....135
ช.4 วงจรรีเลย์มัลติเพล็กเซอร์....137

ช.5 ภาพแสดงอุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย.....137
ช.6 ภาพแสดงโต๊ะปรับเทียบค่า.....138
ช.7 ภาพแสดงชุดขยายสัญญาณ.....138

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย