

การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง

นาย ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

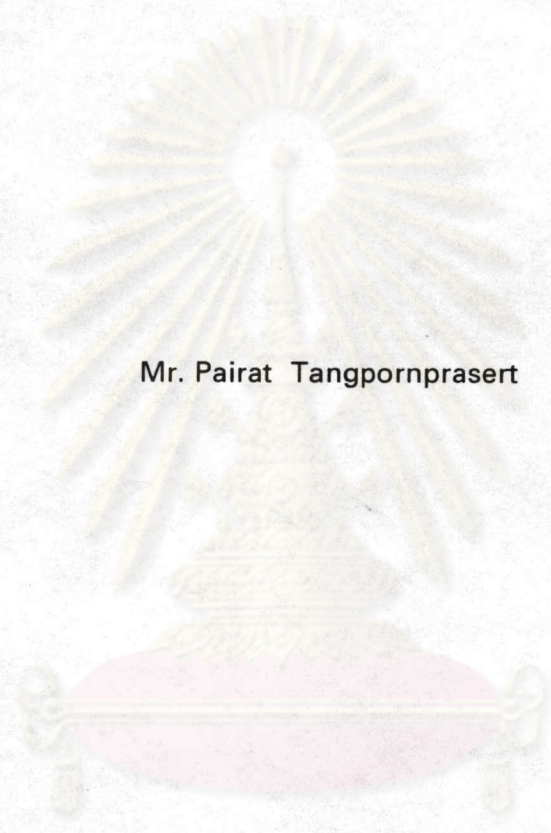
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-729-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I1736271

HYBRID FORCE-POSITION CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR ARM



Mr. Pairat Tangpornprasert

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Graduate School

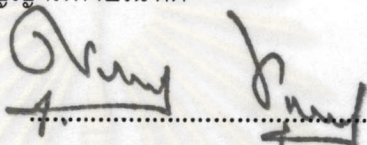
Chulalongkorn University

Academic Year 1996

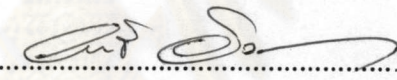
ISBN 974-636-729-3

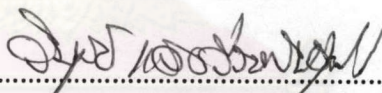
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง
โดย นาย ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

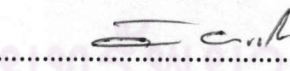
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ อิงภากรณ์)


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


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


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนชกิจ)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ : การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง (HYBRID FORCE-POSITION CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR ARM) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ , 85 หน้า. ISBN 974-636-729-3

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งและได้นำมาทดลองกับแขนกลจุฬา 2 การควบคุมตำแหน่งใช้การควบคุมแบบ Resolved-acceleration สำหรับการควบคุมแรงได้ทำการคำนวณหาทิศทางของแรงที่ปลายแขนกลบนพื้นผิวที่จุดสัมผัสผิสมแบบ real time เพื่อใช้ในการหา compliance frame ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการควบคุมตำแหน่งโดยผลลัพธ์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางที่กำหนดได้ผลเป็นที่ยอมรับได้ ส่วนที่ 2 เป็นการควบคุมแรงโดยปลายแขนกลไม่เคลื่อนที่ โดยมีรูปแบบแรงอ้างอิงเป็นแบบ step, trapezoid และฟังก์ชัน sine ซึ่งแรงที่ควบคุมจะมีการแกว่งบ้างแต่มีแนวโน้มที่จะวิ่งเข้าหาแรงอ้างอิง

ส่วนสุดท้ายเป็นการควบคุมแรงและตำแหน่ง ปลายแขนกลจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวทรงกระบอก โดยกำหนดให้สัญญาณคำสั่งของทั้งแรงและความเร็วเป็นแบบ trapezoid เป็นสัญญาณอ้างอิง สัญญาณคำสั่งของตำแหน่งสามารถหาได้จากสัญญาณคำสั่งของความเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ยิ่งสัญญาณคำสั่งของแรงมีค่ามาก ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก็จะยิ่งสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเสียดทานระหว่างปลายแขนกลกับพื้นผิวที่สัมผัส ส่วนปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการแกว่งของแรงที่ทำการควบคุมได้แก่ backlash และ flexibilities ของแขนกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตำแหน่งที่สัญญาณคำสั่งอ้างอิงขาดความต่อเนื่อง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิติ ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ 15.3.96
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

C615930 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CHULA II / HYBRID / FORCE CONTROL

PAIRAT TANGPORNPRASERT : HYBRID FORCE-POSITION CONTROL OF A ROBOT MANIPULATOR ARM. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D. 85 pp. ISBN 974-636-729-3

The controller for hybrid force-position control is studied in this thesis and implemented on the Chula II manipulator arm. The resolved-acceleration control is used for position control. For the force control, the real-time computation of the direction of force on the contacted surface is used to find the compliance frame so that the motion can be generated.

The experiments will divided into 3 parts. The first part covers the position control. The results, for the linear motion of the robot tip, show the very acceptable position trackings. The second part covers the force control without the end point motion. The referenced force signals are step, trapezoid and sine function. There is some fluctuation of the controlled force. But the outputs have tendency to converge to the reference signals.

The final part covers both force and position controls. The robot tip is controlled to follow a smooth plane surface and a cylindrical surface. The trapezoidal force and velocity command signals are used as the referenced signals. The position command signal can be generated from the velocity command. The results shown that, because of the friction between the robot tip and the surface, the higher the command force, the higher the position error. The backlash and the flexibilities of the robot arm are the main effects of the fluctuation of the controlled force especially at the discontinuity point of the reference signals.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา..... 2539.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *Pairat Tangpornprasert*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Assoc. Prof. Viboon Sangveraphunsiri*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษารวม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายฝ่าย บุคคลแรกที่จะต้องขอกล่าวก่อนใครในที่นี้ คือ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาเสียสละเวลาคอยให้คำแนะนำปรึกษาและให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด รวมทั้งช่วยหาแหล่งเงินทุนต่าง ๆ มาสนับสนุนงานวิทยานิพนธ์นี้ จนงาน สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ส่วนบุคคลท่านต่อ ๆ ไปต้องขอขอบคุณ คุณวิศณุ พงษ์พิพัฒน์ บริษัท วิศณุ และศุภักดิ์ จำกัด ที่ช่วยเหลือในการช่อมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย, คุณชูชาติ นาคทอง ที่ให้ วงจรไฟฟ้าบางวงจร และขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยในส่วนของวัสดุที่ใช้ สร้างแขนกล นอกจากนี้ก็ขอขอบคุณบริษัท NSS จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษาให้โดยไม่มีเงื่อนไข ใด ๆ ทั้งสิ้นเป็นเวลา 2 ปี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| กิตติกรรมประกาศ | จ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญภาพ | ช |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล | 4 |
| 3. ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง | 14 |
| 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ | 25 |
| 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 61 |
| บรรณานุกรม | 64 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก | 66 |
| ภาคผนวก ข | 73 |
| ประวัติผู้วิจัย | 85 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | Coordinate frame ของแขนกลจู่ฟ้า 2 4 |
| 3.1 | แสดงปลายแขนกลจับชอล์กเขียนลงบนกระดานดำ..... 14 |
| 3.2 | แสดงแผนภูมิของระบบควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง..... 16 |
| 3.3 | แสดง Oreintation error 18 |
| 3.4 | แสดง Virtual constraint surface 23 |
| 4.1 | กราฟแสดงการเคลื่อนที่ 25 |
| 4.2 | การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 90 mm 28 |
| 4.3 | ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 90 mm 29 |
| 4.4 | การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 110 mm 30 |
| 4.5 | ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 110 mm 30 |
| 4.6 | การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 130 mm 31 |
| 4.7 | ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลระยะทาง 130 mm 31 |
| 4.8 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 5 N 32 |
| 4.9 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 10 N 33 |
| 4.10 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ step ขนาด 15 N 33 |
| 4.11 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 5 N 34 |
| 4.12 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 10 N 35 |
| 4.13 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N 36 |
| 4.14 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave ขนาด amplitude 5 N 37 |
| 4.15 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave ขนาด amplitude 10 N 38 |
| 4.16 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ sine wave ขนาด amplitude 15 N 38 |
| 4.17 | แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง 39 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.18 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง | 40 |
| 4.19 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง | 40 |
| 4.20 แรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง | 41 |
| 4.21 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 41 |
| 4.22 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 42 |
| 4.23 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 42 |
| 4.24 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 43 |
| 4.25 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 43 |
| 4.26 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 44 |
| 4.27 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 44 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.28 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N..... | 45 |
| 4.29 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรงและเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 45 |
| 4.30 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรงและเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 46 |
| 4.31 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวตรงและเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 46 |
| 4.32 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวตรงและเกิดแรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 47 |
| 4.33 แสดง x-component และ y-component ของ normal vector | 47 |
| 4.34 แรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง | 49 |
| 4.35 แรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 15 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง | 49 |
| 4.36 แรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง | 50 |
| 4.37 แรงกระทำต่อปลายแกนกลแบบ trapezoid ขนาดแรงสูงสุด 30 N ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง | 50 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.38 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 51 |
| 4.39 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 51 |
| 4.40 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 52 |
| 4.41 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง ขณะเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 52 |
| 4.42 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 53 |
| 4.43 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 53 |
| 4.44 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 54 |
| 4.45 แสดงค่า normal vector ของผิวชิ้นงาน ขณะเคลื่อนที่ ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N..... | 54 |
| 4.46 แสดงค่ามิติพลาตของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อ ปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 55 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.47 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 55 |
| 4.48 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 56 |
| 4.49 แสดงค่าผิดพลาดของ orientation ของปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 56 |
| 4.50 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่สัมผัส ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 57 |
| 4.51 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่สัมผัส ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 15 N | 57 |
| 4.52 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่สัมผัส ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 70 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N | 58 |
| 4.53 แสดงรูปร่างของผิวชิ้นงานที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่สัมผัส ขณะเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 110 mm บนชิ้นงานผิวโค้ง และเกิดแรงกระทำต่อปลายแขนกลแบบ trapezoid ด้วยขนาดสูงสุด 30 N..... | 58 |
| ก.1 วงจร Decoder | 68 |
| ก.2 หุ่นยนต์จู่ฟ้า 2 | 70 |
| ก.3 มอเตอร์, แทคโคมิเตอร์และเอนโคดเดอร์ | 70 |
| ก.4 อุปกรณ์วัดแรง (Force sensor) | 71 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| ก.5 การได้รับสัญญาณจาก force sensor | 71 |
| ก.6 แสดงข้อต่อที่ 4 | 72 |
| ก.7 แสดงข้อต่อที่ 5 | 72 |
| ข.1 แสดง open kinematic chain | 73 |
| ข.2 แสดงการตั้งเฟรมตามวิธี Denavit-Hartenberg | 74 |
| ข.3 แสดงการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและเชิงมุมเป็นระยะทางเล็ก ๆ ของปลายแขนกล..... | 76 |
| ข.4 แสดง free body diagram ของข้อต่อแขนกล | 81 |
| ข.5 แสดงการคำนวณสมการ Kinematic และ Dynamic ด้วยวิธี Recursive Computation | 83 |

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย