การออกแบบและวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช-4 พร้อมด้วยการควบคุมแรง

นายณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1047-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NOVEL DESIGN AND ANALYSIS WITH FORCE CONTROL OF THE H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR

Mr.Natdanai Tantawiroon

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2004

ISBN 974-53-1074-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช-4 พร้อมด้วยการควบคุมแรง
โดย	นายณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ

(พลอากาศตรี ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พาลีบัตร์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

นายณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์ : การออกแบบและวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช-4 พร้อมด้วยการควบคุมแรง. (NOVEL DESIGN AND ANALYSIS WITH FORCE CONTROL OF THE H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 89 หน้า. ISBN 974-53-1074-3.

งานวิจัยนี้นำเสนอแขนกลแบบขนานรูปแบบใหม่ในตระกูลเอช-4 ซึ่งมีสามองศาอิสระในการเลื่อนตำแหน่งและหนึ่งองศาอิสระในการหมุน เพื่อสนับสนุนงานด้าน Rapid Prototyping หรือ Automated CMM รูปแบบของแขนกลที่เสนอในงานวิจัยนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่าและมีปริมาตรทำงานในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่กำหนดรวมถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) สูงกว่าแขนกลขนานแบบ Stewart หรือแบบดั่งเดิม ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งทั้ง Forward และ Inverse Kinematics ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว การวิเคราะห์ความแข็งเกร็ง (Stiffness) รวมถึงการวิเคราะห์ Singularities อย่างละเอียด นอกจากนี้ยังนำเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของแขนกลที่อยู่ในรูปแบบเชิงวิเคราะห์มาใช้ในการควบคุมแรงกระทำของแขนกลต่อวัตถุแวดล้อมด้วย

แขนกลที่สร้างขึ้นได้รับการทดสอบการเคลื่อนที่และความสามารถในการควบคุมแรงกดที่ปลายแขนกับวัตถุแวดล้อมที่มีพื้นผิวไม่แน่นอนโดยไม่ทราบข้อมูล CAD ของพื้นผิววัตถุมาก่อน ได้ทดสอบการควบคุมแรงในหลายลักษณะกับวัตถุหลายชนิดเช่นเรสิน ไม้ และโลหะ ผลการทดสอบตัวควบคุมแรงพบว่าสามารถควบคุมแรงกดระหว่าง 10 ถึง 40 นิวตันได้โดยมีความผิดพลาดของแรงไม่เกิน ± 5 นิวตัน โดยที่ความเร็วของปลายแขนกลอยู่ที่ 15 ถึง 60 เซนติเมตรต่อนาทีขณะควบคุมแรง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4371809521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: PARALLEL ROBOT / H-4 / FORCE CONTROL / IMPLICIT

NATDANAI TANTAWIROON : NOVEL DESIGN AND ANALYSIS WITH FORCE CONTROL OF THE H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 89 pp. ISBN 974-53-1074-3.

This paper illustrates the novel asymmetry design of a H-4 family of parallel robot with three degrees of freedom in translation and one in rotation aim for human interfaced rapid prototyping or CMM application. The forward and inverse position and velocity relationships are presents. The design shows the advantage over the other conventional design in less complexity of direct kinematics solutions, greater workspace in one selected axis. The prototype arm has been built and test using hybrid force-position control scheme in conjunction with analytical robot compliance matrix to further calculate robot stiffness and deflection online. Force control was conduct through various tracking situation include resin and metal surface at 10 to 40 Newton with track speed from 15 to 60 cm per min. The results show good tracking ability with average error about 5 N.

Department Mechanical Engineering Student's signature NATDANAI T.

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature

Academic year 2004 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุน 72 พรรษาเป็นค่าเทอมและค่าใช้จ่ายแก่ข้าพเจ้าทำให้ทำงานวิจัยได้อย่างเต็มที่ ขอขอบคุณ คุณพรชัย เพชรฤกษกุล และน้องๆ และคุณราชัน ชานนท์เมืองที่ช่วยสร้างชิ้นส่วนต่างๆของแขนกล ขอขอบคุณ คุณทวี งามวิไลกร ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบและสร้างชิ้นส่วน ขอบคุณคุณเกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัยที่ช่วยติดต่ออาจารย์และจองห้อง ขอบคุณสาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสนที่ทำให้ข้าพเจ้าได้รับประสพการณ์ใหม่ และขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและเอกทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัยเสมอมา

ท้ายสุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 5

1.3 ขอบเขต 5

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

2. การออกแบบและวิเคราะห์แขนกลแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระ 7

2.1 รูปแบบทั่วไปแขนกลแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระ 7

2.2. รูปแบบของแขนกลแบบขนานในงานวิจัยนี้ 13

2.2.1 การวิเคราะห์อินเวิร์สคิเนแมติกส์ 14

2.2.2 การวิเคราะห์ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ 16

2.2.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว 18

2.2.4 การวิเคราะห์ซิงกูลาริตีส์ของแขนกล 20

2.3 การหาปริมาตรทำงาน (Working volume) ของแขนกล 22

2.4 การหาเมตริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness matrix) ของแขนกล 26

3. การออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งและแรงของแขนกล 32

3.1 การควบคุมแรงที่แขนกลกระทำต่อวัตถุแวดล้อม 32

3.1.1 การควบคุมแรงโดยตรงหรือแบบเอกซ์พลิซิท (Explicit Force Control) 33

3.1.2 การควบคุมแรงโดยอ้อมหรือแบบอิมพลิซิท (Implicit Force Control) 34

3.2 การคำนวณระยะยุบตัวของแขนกลเพื่อใช้ในการควบคุมแรง 36

3.3 การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 41

บทที่ หน้า

4. การทดสอบการควบคุมตำแหน่งและแรงของแขนกล 43
4.1 รูปแบบและอุปกรณ์ควบคุมแขนกล 43
4.2 การทดสอบแขนกลที่สร้างขึ้น 45
4.2.1 การทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของแขนกล 46
4.2.2 การควบคุมแรงกดต่อวัตถุแวดล้อม 49
4.2.2.1 การควบคุมแรงกดโดยมุมเอียง Platform เป็นศูนย์องศา....49
4.2.2.2 การควบคุมแรงบนวัตถุที่มีพื้นผิวไม่ต่อเนื่อง 61
4.2.2.3 การควบคุมแรงกดโดยแปรเปลี่ยนมุม platform ให้ตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ 63
4.2.2.4 การควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความยืดหยุ่น 65
4.3 อภิปรายผลการทดสอบ....69
4.4 ข้อเสนอแนะ....70
รายการอ้างอิง....72
ภาคผนวก....77
ภาคผนวก ก พอร์ตอินพุตและเอาท์พุตที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณควบคุมแขนกล....78
ภาคผนวก ข ความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ของตำแหน่งความเร็วและความแข็งตึงของแขนกล...81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....89

ตาราง หน้า

ตาราง 1.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติหุ่นยนต์แบบซีเรียลกับแบบขนาน 2
ตาราง 4.1 การทดสอบ Repeatability ในแกน+x +y และ +z.....47
ตาราง 4.2 การทดสอบ Repeatability ในแกน -y และ –z.....47
ตาราง 4.3 การทดสอบ Repeatability ในแกน $+\theta$ และ $\pm\theta$ 48
ตาราง ก.1 พอร์ทที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณแอนาลอก.....76
ตาราง ก.2 พอร์ตรับสัญญาณเอนโคเดอร์.....77

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 1.1 VARIAX เครื่องกัดที่ใช้กลไกขนานหกองศาอิสระ “Hexapod” 2
รูปที่ 2.1 การเรียงตัวของข้อต่อตามเงื่อนไขของกลไกแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระ 8
รูปที่ 2.2 รูปแบบทั่วไปของกลไกแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระ 9
รูปที่ 2.3 การหมุนพิกัด **{O}** ให้แกน **i** ทับกับแกน $\mathbf{u}_i$ บนพิกัด **{D}** 10
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางที่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ได้ของจุดปลายเวคเตอร์ **C** 12
รูปที่ 2.5(1) รูปแบบของแขนกลขนานที่มีสี่องศาอิสระรวมถึงรายละเอียดบริเวณข้อต่อหมุนที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ออกแบบโดยโปรแกรม SolidEdge®) 13
รูปที่ 2.5(2) รายละเอียดบริเวณข้อต่อหมุนที่เชื่อมต่อระหว่าง Metachain ทั้งสองข้างเข้ากับ Moving platform (ออกแบบโดยโปรแกรม SolidEdge®) 13
รูปที่ 2.5(3) รูปแบบการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล 14
รูปที่ 2.6 แสดงการกำหนดตัวแปรเพื่อจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้น 16
รูปที่ 2.7 รูปแบบซิงกูลาริตีส์ที่เป็นไปได้ 22
รูปที่ 2.8 ระยะทางที่ข้อต่อขับเคลื่อนที่ได้จริง 22
รูปที่ 2.9 พื้นที่ทำงานในระนาบ yz ของแขนกลโดยแปรผันขนาด (a-b) ต่างๆ Platform ทำมุมเอียง 0 องศา 23
รูปที่ 2.10 พื้นที่ทำงานในระนาบ yz ของแขนกลแปรผันขนาด Platform c และ d ต่างๆ และกำหนดให้ c = d platform เอียงทำมุม 60 องศา 24
รูปที่ 2.11 พื้นที่ทำงานในระนาบ yz ของแขนกลแปรผันอัตราส่วน c และ d ต่างๆ และกำหนดให้ c คงที่ Platform ทำมุม 0 องศา 25
รูปที่ 2.12 พื้นที่ทำงานในระนาบ yz ของแขนกลแปรผันความยาวของขา R และกำหนดให้ Platform ทำมุม 0 องศา 25
รูปที่ 2.13 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 0 องศา 28
รูปที่ 2.14 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 30 องศา 28
รูปที่ 2.15 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 60 องศา 29
รูปที่ 2.16 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 80 องศา 29
รูปที่ 2.17 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 0 องศา กำหนดความกว้างของฐานแขนกล (a-b) เป็น 0.04 เมตร 30

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.18 ค่าCondition number ของแขนกลขณะ Platform ทำมุม 60 องศา กำหนดความกว้างของฐานแขนกล (a-b) เป็น 0.04 เมตร 31
รูปที่ 3.1 การกำหนดกรอบพิกัดอ้างอิงของแขนกลและกรอบพิกัดบนวัตถุ 32
รูปที่ 3.2 ทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง 33
รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อคการควบคุมตำแหน่งและแรงของแขนกล 34
รูปที่ 3.4 การกำหนดตัวแปรบอกตำแหน่งของแขนกลให้เหมาะสมเพื่อหาสมาชิกของ Compliance matrix 37
รูปที่ 3.5 Free-body diagram ของแขนกลโดยมีแรงหนึ่งหน่วยกระทำในทิศต่างๆ 38
รูปที่ 3.6 Free-body diagram ของแรงที่ข้อต่อขับแต่ละข้อต่อ 39
รูปที่ 3.7 ความผิดพลาดของแรงในการควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีพื้นผิวไม่แน่นอน 41
รูปที่ 3.8 บล็อคไดอาแกรมของตัวควบคุมตำแหน่งและแรงโดย MATLAB/Simulink ® 42
รูปที่ 4.1 แขนกลแบบขนานที่มีสี่องศาอิสระที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ 44
รูปที่ 4.2 การวางตัวของข้อต่อขับทั้งสี่ของแขนกลแบบขนานที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ 44
รูปที่ 4.3 รายละเอียดบริเวณ Platform ของแขนกลแบบขนานที่สร้างขึ้น 45
รูปที่ 4.4 รายละเอียดบริเวณ Platform ของแขนกลแบบขนานและตัวตรวจรู้แรงที่ใช้ 45
รูปที่ 4.5 การทดสอบความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งแขนกลโดยใช้ Dial gauge 47
รูปที่ 4.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการทดลองควบคุมแรงกดบนเรซิน 49
รูปที่ 4.7 การควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 30 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 49
รูปที่ 4.8 การควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 50
รูปที่ 4.9 กาควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 15 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 50
รูปที่ 4.10 การควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที 51
รูปที่ 4.11 การควบคุมแรงกดบนเรซินที่แรงกด 20 N ความเร็ว 9 เซนติเมตรต่อนาที 51
รูปที่ 4.13 การควบคุมแรงกดบนเรซิน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 52
รูปที่ 4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการทดลองควบคุมแรงกดบนเหล็ก 53
รูปที่ 4.15 การควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 30 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที 53
รูปที่ 4.16 การควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 30 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 54
รูปที่ 4.17 การควบคุมแรงกดบนเหล็กที่แรงกด 20 N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 54

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.18 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมที่แรงกด 30 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที..... 55
รูปที่ 4.19 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมที่แรงกด 40 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที..... 55
รูปที่ 4.20 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที..... 56
รูปที่ 4.21 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 20 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที..... 56
รูปที่ 4.22 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที..... 57
รูปที่ 4.23 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที..... 57
รูปที่ 4.24 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 20 N ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที..... 58
รูปที่ 4.25 การควบคุมแรงกดบนเหล็กทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที..... 58
รูปที่ 4.26 การควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N ความเร็ว 24 เซนติเมตรต่อนาที..... 59
รูปที่ 4.27 การควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 30 และ 15 N ความเร็ว 36 เซนติเมตรต่อนาที..... 59
รูปที่ 4.28 การควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 30 N ความเร็วเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 12 และ 36 เซนติเมตรต่อนาที 60
รูปที่ 4.29 การควบคุมแรงกดบนเหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้านใน แรงกด 10 N ความเร็วเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดที่ 12 และ 36 เซนติเมตรต่อนาที 60
รูปที่ 4.30 การควบคุมแรงกดบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได..... 61
รูปที่ 4.31 การควบคุมแรงกดบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได แรงกด 30 N ความเร็ว 18 เซนติเมตรต่อนาที..... 61
รูปที่ 4.32 การควบคุมแรงกดบนไม้ที่มีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดแรงกด 40 N ความเร็ว 18 เซนติเมตรต่อนาที..... 62

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.33 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 20N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที 63
รูปที่ 4.34 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 30N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที 63
รูปที่ 4.35 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 20N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 64
รูปที่ 4.36 การควบคุมแรงกดบนอลูมีเนียมแบบแปรเปลี่ยนมุมเอียงของ Platform แรงกด 30N ความเร็ว 21 เซนติเมตรต่อนาที 64
รูปที่ 4.37 ลักษณะของวัตถุที่มีความยืดหยุ่นซึ่งใช้ในการทดลองควบคุมแรงกด 65
รปที่ 4.38 ทิศทางการ เคลื่อนที่ของแขนกลในการควบคุมแรงกดบนวัตถุที่มีความยืดหยุ่น วัสดุที่ใช้คือกล่องใส่อาหารทำจากโฟมมีความหนา 1 มิลลิเมตร และมีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวสองแห่ง 65
รูปที่ 4.39 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 15 เซนติเมตรต่อนาที..... 66
รูปที่ 4.40 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 30 เซนติเมตรต่อนาที..... 66
รูปที่ 4.41 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 45 เซนติเมตรต่อนาที..... 67
รูปที่ 4.42 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 7 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที..... 67
รูปที่ 4.43 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 10 N ความเร็ว 45 เซนติเมตรต่อนาที.... 68
รูปที่ 4.44 การควบคุมแรงกดบนวัตถุยืดหยุ่นที่แรงกด 10 N ความเร็ว 60 เซนติเมตรต่อนาที.... 68
รูปที่ 4.45 งานวิจัยในอนาคต การควบคุมระบบ Master-Slave 70