การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ

นายศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4830-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21559120

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A THREE DIMENSIONAL COBOT

Mr. Sirisak Sirikasemsuk

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 2003

ISBN 974-17-4830-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ
โดย	นายศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์)

ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข : การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ. (DESIGN AND DEVELOPMENT OF A THREE DIMENSIONAL COBOT) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. วิทยา วัณณสุโภ ประสิทธ์ 124 หน้า. ISBN 974-17-4830-2.

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย หุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆเข้ามาทำหน้าที่บางอย่างแทนมนุษย์ หรือช่วยการทำงานของมนุษย์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากหุ่นยนต์ทั่วไปเป็นระบบแอกทีพ (Active) มีอุปกรณ์ต้นกำลังที่แต่ละข้อต่อ ทำให้เมื่อเกิดการผิดพลาดจากระบบควบคุมหรือสัญญาณต่างๆ หุ่นยนต์อาจเคลื่อนที่และอาจทำอันตรายแก่มนุษย์ที่ทำงานอยู่ร่วมกันได้ งานวิจัยนี้นำเสนอหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยตรงและปลอดภัย โดยเรียกรูปแบบนี้ว่าโคบอท (Colaborative Robot-Cobot) โคบอทไม่ใช้อุปกรณ์ต้นกำลังในการขับ แต่ทว่าโคบอทใช้การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อเพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ ในการสร้างความสัมพันธ์ของข้อต่อทีมวิจัยใช้ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมาต่อเข้ากับข้อต่อต่างๆ ของหุ่นยนต์ ด้วยวิธีการนี้จะทำให้โคบอทเป็นระบบพาสซีฟ (Passive) สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ ได้อย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการพัฒนา ออกแบบ และจัดสร้างต้นแบบหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ (3D Cobot) ที่มีลักษณะเป็นอุปกรณ์แบบแขนกลที่มีพื้นที่การทำงานเชิงเส้น 3 มิติ บนแกนคาร์ทีเซียน (X,Y,Z) โดยใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบล้อจำนวน 3 ชุด นำมาต่อแบบขนานเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของทรงกลม งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของจลศาสตร์ในสเปซต่างๆ ของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ ซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ ตัวอย่างการใช้งานของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ ประกอบด้วยการใช้เป็นอุปกรณ์สร้างความรู้สึกเสมือนจริง (Haptic Interface) การใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับนำและช่วยแพทย์ในการผ่าตัด และการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยมนุษย์ในการประกอบชิ้นงานต่างๆ เป็นต้น

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2546

437 05193 21 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: COBOT / CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSSMISSION / HAPTIC INTERFACE

SIRISAK SIRIKASEMSUK: DESIGN AND DEVELOPMENT OF A THREE DIMENSIONAL COBOT. THESIS ADVISOR : PROF. WITAYA WANNASUPHOPRASIT, 124 pp. ISBN 974-17-4830-2

Currently robotics technologies are utilized in several areas. For example, robots have been used to assist or replace some human operator task. Conventional robots generate motions by using actuators to power at each joint, and thus they are active systems. Any malfunctions on controller or sensor signal could result in unpredicted movement and put human operator in potential danger. This research work proposed a novel robotic system that ensures safety when works with human operator, called Collaborative Robot-Cobot. Cobots do not used actuator to power their joints, but rather create motion relations between each joint by using a device call CVTs. CVts are continuous variable transmissions. With these method, Cobot can direct human motion passively and thus intrinsically safe with human operator. We designed, developed, and build the prototype of a three dimensional Cobot manipulator. We used three wheel CVTs and connected them in parallel to control a sphere motion. The sphere rotations are then transmitted to a manipulator movement in Cartesian workspace (x,y,z). In addition, we analyzed and derive kinematics of this Cobotic manipulator, which is essential to controller design. Possible applications include Haptic Interface, Virtual Reality, Robot assisted surgery, and Robot assisted assembly etc.

Department Mechanical Engineering Student's signature .....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อ.ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยวิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณอาจารย์ อ.ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์ ผศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ และ อาจารย์ อ.ดร.วัชระ เลิศพิริยะสุวัฒน์ สำหรับโอกาสในการร่วมทำงานในโครงการวิจัยของ MTEC ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ ที่ได้ให้ความรู้และเงินสนับสนุนการศึกษามาตลอด และขอขอบคุณสำหรับทุกๆ ท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดี แก่กันเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย 2

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ 3

บทที่ 2 หุ่นยนต์โคบอทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 แนะนำหุ่นยนต์โคบอท 4

2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในหุ่นยนต์โคบอท 5

2.2.1 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้น 5

2.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม 6

2.3 แบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท 8

2.3.1 การทำงานแบบอิสระ(Virtual Caster) 9

2.3.2 การทำงานแบบผนังเสมือน (Virtual Wall) 10

2.4 ตัวอย่างงานวิจัยโคบอท 10

2.4.1 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot) 10

2.4.2 หุ่นยนต์โคบอทสกูตเตอร์ (Scooter Cobot) 10

2.4.3 หุ่นยนต์โคบอทสามอาร์โคบอท (3R Cobot) 12

2.4.4 หุ่นยนต์โคบอทแบบราง (Rail Cobot) 14

2.4.5 หุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุม (Joystick Cobot) 15

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ 16
3.1 แนวความคิดในการออกแบบ 16
3.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นกับทรงกลม 16
3.3 การออกแบบแขนกลและระบบส่งกำลัง 18
3.4 การออกแบบชุดจับยึดแขนกล 22
3.5 สรุปโครงสร้างหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ 23
3.6 การสร้างและการประกอบ 24

บทที่ 4 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ 29
4.1 จลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) 30
4.2 จลศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics) 35
4.3 เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian) 39
4.4 จลศาสตร์แบบหุ่นยนต์โคบอทในสเปซการเคลื่อนที่ของทรงกลม 41
4.5 จลศาสตร์ของชุดซีวีทีเชิงเส้นที่ต่อกับทรงกลม 45

บทที่ 5 การทดลอง 51
5.1 หลักการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทสามมิติเพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง 51
5.2 การทดลองและผลการทดลอง 53

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและการอภิปราย 70
6.1 สรุปการศึกษาผลวิจัยที่ผ่านมา 70
6.2 สรุปผลการออกแบบและการสร้าง 70
6.3 สรุปผลการการทดลอง 72
6.4 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง 72

รายการอ้างอิง 73
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์ 76
ก.1. ล้อโรลเลอร์เบรด 76

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ก.2. แผงวงจร SPii PCI Controller 77
ก.3. ชุดขับมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-6UE 78
ก.4. มอเตอร์ไร้แปลงถ่านยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE 79
ก.5. เอ็นโคดเดอร์ Koyo TRD-SH2500VA 80
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานของการเคลื่อนที่ของแขนกล 81
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 124

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรของข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ.....31
ตารางที่ 6.1 แสดงการเคลื่อนที่มากสุดและน้อยสุดของแต่ละข้อต่อ.....71

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท 4

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นแบบล้อ ก. ลักษณะโครงสร้างของล้อที่เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง, ข. แสดงหลักการทำงานของซีวีทีเชิงเส้น ซึ่งจะได้อัตราทดคือ $T = \frac{V_y}{V_x} = \tan\alpha$ 6

รูปที่ 2.3 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม [7] 7

รูปที่ 2.4 ซีวีทีลูกทรงกลม ที่มา: จาก [7] 7

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับมุมเลี้ยว 8

รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวที่มา: จาก [4] 9

รูปที่ 2.7 การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว [5] 9

รูปที่ 2.8 การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเมื่อสร้างกำแพงเสมือนเป็นวงกลม [5] 10

รูปที่ 2.9 สกูตเตอร์ที่มา: จาก [4] 11

รูปที่ 2.10 การนำสกูตเตอร์ไปใช้งาน (Courtesy of General Motors Corporation) 12

รูปที่ 2.11 ซีวีทีทรงกลมที่ออกแบบไว้สำหรับหุ่นยนต์สามอาร์โคบอท 12

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างลักษณะของการติดตั้งซีวีทีทรงกลมไว้กับข้อต่อต่างๆของแขนกล 13

รูปที่ 2.13 การต่อเครือข่ายของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบขนาน 13

รูปที่ 2.14 หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท ที่มา: จาก [9] 14

รูปที่ 2.15 หุ่นยนต์โคบอทแบบราง 15

รูปที่ 2.16 หุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุม 15

รูปที่ 3.1 การวางอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นจำนวน 3 ชุดของหุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุม 16

รูปที่ 3.2 ก. ระนาบแกนหมุน 17

รูปที่ 3.2 ข. แกนหมุนที่เกิดจากการตัดกันของสองระนาบ 17

รูปที่ 3.3 การออกแบบหุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่รวมชุดซีวีทีทรงกลม และชุดฐาน 18

รูปที่ 3.4 ลักษณะกลไกของแขนกลที่มี 3 ข้อต่อ 19

รูปที่ 3.5 ลักษณะการติดตั้งแขนกลเข้ากับทรงกลม 19

รูปที่ 3.6 การออกแบบชุดลดองศาอิสระและชุดสร้างแรงกดให้ล้อ 20

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 ลักษณะการออกแบบชุดส่งกำลังที่ติดตั้งกับทรงกลม....20
รูปที่ 3.8 ลักษณะของแขนกลและชุดส่งกำลังที่ติดตั้งบนแขนกล....21
รูปที่ 3.9 การทำงานของชุดส่งกำลัง....21
รูปที่ 3.10 กลไกข้อต่อแบบซีเอ็มเอ็ส ที่มา: จาก [18]....22
รูปที่ 3.11 ชุดพยุงแขนกลของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ....23
รูปที่ 3.12 หุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ....23
รูปที่ 3.13 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ....24
รูปที่ 3.14 การขึ้นรูปทรงกลม....24
รูปที่ 3.15 ชุดแกนกลางของทรงกลม....25
รูปที่ 3.16 ชุดส่งกำลังที่ติดตั้งบนทรงกลม....25
รูปที่ 3.17 ชุดแขนกลที่ประกอบเสร็จแล้ว....26
รูปที่ 3.18 ชุดจับยึดแขนกลที่ประกอบเสร็จแล้ว....26
รูปที่ 3.19 การจับยึดชุดซีวีที....27
รูปที่ 3.20 หุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่ประกอบเสร็จ....28
รูปที่ 4.1 ลักษณะจลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ....30
รูปที่ 4.2 การกำหนดเฟรมให้กับหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ....31
รูปที่ 4.3 การเคลื่อนที่ θ_1 ที่อ้างอิงบนเฟรมฐาน....42
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ θ_2 ที่อ้างอิงบนเฟรมฐาน....42
รูปที่ 4.5 การเคลื่อนที่ θ_3 ที่อ้างอิงบนเฟรมฐาน....43
รูปที่ 4.6 เวกเตอร์บอกตำแหน่ง $\bar{R}_S$ ของทรงกลมบนเฟรมฐาน....44
รูปที่ 4.7 การนิยามตำแหน่งของชุดซีวีทีทั้งสาม....46
รูปที่ 4.8 เฟรมของแต่ละชุดซีวีทีเทียบกับเฟรมฐาน....47
รูปที่ 4.9 ก. ระนาบแกนหมุนของล้อบนเฟรมสามมิติ....49
รูปที่ 4.9 ข. ระนาบแกนหมุนบนระนาบ X-Y....49
รูปที่ 5.1 วิธีการหาตำแหน่งมุมบิดของล้อให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง....52
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งการติดตั้งเอ็นโคดเดอร์....53
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะวิธีทดลองด้วยการแขวนมวลที่ปลายแขนกล....54
รูปที่ 5.4 การเคลื่อนที่ของตำแหน่งแกนหมุนล้อเทียบกับระยะทางของปลายแขนที่เคลื่อนไป....55

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.5 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 250 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 1 56
รูปที่ 5.6 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 250 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 2 56
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 250 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 3 57
รูปที่ 5.8 การเคลื่อนที่ปลายแขนกลด้วยการถ่วงน้ำหนัก 250 กรัม 58
รูปที่ 5.9 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 250 กรัมในแกน X-Z 58
รูปที่ 5.10 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 250 กรัมในแกน Y-Z 59
รูปที่ 5.11 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 350 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 1 60
รูปที่ 5.12 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 350 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 2 60
รูปที่ 5.13 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 350 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 3 61
รูปที่ 5.14 การเคลื่อนที่ปลายแขนกลด้วยการถ่วงน้ำหนัก 350 กรัม 62
รูปที่ 5.15 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 350 กรัมในแกน X-Z 62
รูปที่ 5.16 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 350 กรัมในแกน Y-Z 63
รูปที่ 5.17 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 450 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 1 64
รูปที่ 5.18 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 450 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 2 64
รูปที่ 5.19 ผลทดสอบจริงด้วยมวล 450 กรัม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองของ ข้อต่อ 3 65
รูปที่ 5.20 การเคลื่อนที่ปลายแขนกลด้วยการถ่วงน้ำหนัก 450 กรัม 66
รูปที่ 5.21 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 450 กรัมในแกน X-Z 66
รูปที่ 5.22 การเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนด้วยการถ่วงน้ำหนัก 450 กรัมในแกน Y-Z 67
รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งล้อจริงกับการจำลองการทำงาน 68

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.24 แสดงความผิดพลาดการเคลื่อนที่เกิดขึ้นเพราะระยะ s ไม่ตรงกับตำแหน่งจริงในเส้นทางที่ต้องการ 68
รูปที่ 6.1 แสดงหุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่เสร็จสมบูรณ์ 71
รูปที่ ก.1 ล้อโรลเลอร์เบรด 76
รูปที่ ก.2 แผงวงจร SPii PCI Controller 77
รูปที่ ก.3 ชุดขับมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-6UE 78
รูปที่ ก.4 มอเตอร์ไร้แปลงถ่าน ยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE 79
รูปที่ ก.5 เอ็นโคดเดอร์ Koyo TRD-SH2500VA 80