การออกแบบและพัฒนากลไก 3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบกระทัดรัด

นายเด่น จันทร์ทองอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 3 DOF MECHANISM FOR COMPACT SIMULATOR

Mr. Dan Chuntongorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501788

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนากลไก 3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบกระทัดรัด
โดย	นายเด่น จันทร์ทองอ่อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์)

เด่น จันทร์ทองอ่อน : การออกแบบและพัฒนากลไก 3 องศาอิสระ สำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบกระทัดรัด (DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 3 DOF MECHANISM FOR COMPACT SIMULATOR) อ. ที่ปรึกษา :ผศ. ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์, 125 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับยานยนต์ที่สามารถสร้างความเสมือนจริง โดยการออกแบบนั้นได้ศึกษารูปแบบ ข้อดี ข้อเสีย ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่มีอยู่ในปัจจุบันลักษณะต่างๆ และที่สำคัญได้ศึกษาและนำความรู้ ปัจจัยความสามารถในการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์มาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบ ทั้งนี้ได้ทำการทดลองวัดความเร่งในแกนสำคัญของรถยนต์ในตำแหน่งของผู้ขับขี่จากสนามแข่งรถจริงมากำหนดขอบเขตความเร่งในการจำลองอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าการเคลื่อนที่ใน 3 องศาอิสระนั้นเพียงพอต่อการจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ โดยกำหนดว่าจุดหมุนของการเคลื่อนที่ควรอยู่ ณ ตำแหน่งศีรษะของมนุษย์ และพบว่ากลไกที่มีความเหมาะสมในการนำมาสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่คือ กลไกแบบ CMS Joint (Concentric Multilink Spherical Joint) ที่มี 3 องศาอิสระ ซึ่งกลไกดังกล่าวมีขอบเขตการเคลื่อนที่สูงเพียงพอ และสามารถกำหนดจุดหมุนได้ตามต้องการ การจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์นั้นใช้หลักการเอียงที่นั่งเพื่อใช้ความเร่งในแนวดิ่ง สร้างความเร่งเสมือนในแนวด้านหน้า (roll) และด้านข้างรถยนต์ (pitch) และเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวรัศมี เพื่อจำลองความเร่งในแนวดิ่ง ทั้งนี้ได้สร้างต้นแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขนาดย่อส่วนเพื่อศึกษาและทดสอบการควบคุมสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่สำหรับยานยนต์เบื้องต้น

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต เด่น จันทร์ทองอ่อน

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

4670682121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: DRIVING SIMULATOR / HUMAN PERCEPTION / CMS JOINT / DOF
DAN CHUNTHONGORN : DESING AND DEVELOPMENT OF A 3 DOF MECHANISM FOR COMPACT SIMULATOR. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WITAYA WANNASUPHOPRASIT,125 pp.

This thesis presents the design of driving simulator for realistic driving feeling. Several simulators are reviewed to study mechanisms and configurations as well as advantage/disadvantage of each model. In order to understand human feeling under motion, we study human perception and use these factors for our design. In additions, we confirm range of motions by performing an experiment to measure key accelerations from a real car in a racing circuit. From overall study, a three DOF simulator is appropriated and can perform realistic motions of vehicle provided that the center of rotation is fixed around the human head. There are several three DOF mechanisms. However, the main mechanism relies on a mechanism called CMS Joint (Concentric Multilink Spherical Joint) because it has three DOF motions with wide range of motion, and can easily control its center of rotation. The simulator uses gravity to simulate vehicle accelerations in forward and transverse directions by tilting human body. The vertical acceleration can generate directly by vertical movement. Finally, a scaling prototype is developed to test motion and control of vehicle simulation.

Department Mechanical Engineering Student's signature
Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature
Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งจัดหาทุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยวิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบความสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์ ผศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ สำหรับโอกาสในการร่วมทำงานในโครงการวิจัยของ MTEC ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ ที่ได้ให้ความรู้และข้อคิดเห็นในงานวิจัย และขอขอบคุณสำหรับทุก ๆท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่าง ๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดี แก่กันเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย 1

1.3 จุดประสงค์ 1

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 2

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 หลักการทำงานของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 3

2.2 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบต่างๆ 4

2.2.1 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระแบบไฮดรอริก 4

2.2.2 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระแบบ PemRam 4

2.2.3 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระแบบมอเตอร์เชิงเส้น 6

2.2.4 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาแบบเกียร์มอเตอร์ 6

2.2.5 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระแบบมอเตอร์ 7

2.2.6 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระแบบไฮดรอริก 7

2.2.7 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 2 องศาอิสระแบบเกียร์มอเตอร์ 7

2.3 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.3.1 การพัฒนาวิธีการจำลองการเคลื่อนที่สำหรับตัวแบบจำลองการเคลื่อนที่ 8

2.3.2 การควบคุมการเคลื่อนที่จากระยะไกลกับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 9

2.3.3 การตรวจสอบความสามารถในการรับรู้ความเร็วในการหมุนแนวดิ่งของมนุษย์ 10

หน้า

2.3.4 การพัฒนา Washout out filter สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของรถมอเตอร์ไซด์ 10

บทที่ 3 การรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ 11
3.1 ระบบประสาท 11
3.1.1 ระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system) 11
3.1.2 ระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral nervous system) 12
3.1.3 ระบบประสาทอัตโนมัติ (Autonomic nervous system) 12
3.2 ระบบการทรงตัว (Equilibrium System) 13
3.2.1 ระบบการมองเห็น (Vision system) 13
3.2.2 ระบบการรับความรู้สึกจากกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception system) 14
3.2.3 ระบบการรับรู้ความเร่ง (Vestibular system) 15

บทที่ 4 ขอบเขต แนวคิด และการศึกษากลไก สำหรับออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 24
4.1 แนวคิดของหลักการในการจำลองการเคลื่อนที่ 24
4.2 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 26
4.2.1 ขอบเขตจากการทดสอบวัดความเร่งรถยนต์ในสนามแข่งรถ 26
4.2.2 ขอบเขตจากตัวอย่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน 32
4.2.3 ขอบเขตระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ 34
4.2.4 สรุปขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 35
4.3 แนวความคิดในการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 36
4.3.1 วิธีเลือกจุดหมุนของกลไกหลัก 36
4.3.2 ขอบเขตของการหมุน 37
4.3.3 ขีดจำกัดของอัตราการเร่งเชิงมุม 38
4.4 การศึกษากลไกปัจจุบันที่เหมาะสมกับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 39
4.4.1 กลไกแบบ สจ๊วจ 39
4.4.2 กลไกแบบ 3-UPU 40
4.4.3 กลไกแบบ CMS 40
4.4.4 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ 41
4.5 สรุปกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 42

บทที่ 5 การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 45

หน้า

5.1 โครงสร้างกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 45
5.2 การวิเคราะห์ภาระภายในก้านต่อ 48
5.3 การออกแบบโครงสร้างของก้านต่อในเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 54
5.4 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 59
5.4.1 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม *Pitch* ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 62
5.4.2 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม *Roll* ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 65
5.4.3 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนแกน Z ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 66
5.5 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ 68

บทที่ 6 จลศาสตร์แบบไปข้างหน้าของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 69

บทที่ 7 ต้นแบบขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 78
7.1 โครงสร้างต้นแบบขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 78
7.2 การออกแบบโครงสร้างของก้านต่อ 79
7.3 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขนาดย่อส่วน 81
7.3.1 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม *Pitch* 82
7.3.2 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม *Roll* 83
7.3.3 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนในแนวดิ่ง 84
7.4 ต้นแบบขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่สมบูรณ์ 85
7.5 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของต้นแบบ 86
7.6 การทดลองการเคลื่อนที่เบื้องต้นของต้นแบบ 86

บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและการอภิปราย 95
8.1 สรุปการศึกษาผลวิจัยที่ผ่านมา 95
8.2 สรุปผลการออกแบบและการสร้าง 95
8.3 ข้อเสนอแนะ และงานวิจัยต่อเนื่อง 97

รายการอ้างอิง 98
ภาคผนวก 101
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์ 102
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 107
ภาคผนวก ค. ก้านต่อของกลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 110
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 113

หน้า

A Design of 3 DOF Driving simulator 114
การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ยานยนต์สำหรับการรับรู้ของผู้ขับขี่ 120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 125

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน 32
ตารางที่ 4.2 ขอบเขตการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ 34
ตารางที่ 4.3 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 36
ตารางที่ 6.1 ตัวแปรของข้อต่อเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 70
ตารางที่ 7.1 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 86

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การเอียงเบาะนั่งเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าของมนุษย์ 4
รูปที่ 2.2 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบีย 5
รูปที่ 2.3 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ขับด้วย PemRam 5
รูปที่ 2.4 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบมอเตอร์เชิงเส้น 6
รูปที่ 2.5 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระขับโดยเกียร์มอเตอร์ 6
รูปที่ 2.6 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระขับโดยมอเตอร์ 7
รูปที่ 2.7 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระขับโดยไฮดรอริก 8
รูปที่ 2.8 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 2 องศาอิสระขับโดยเกียร์มอเตอร์ 8
รูปที่ 2.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง 9
รูปที่ 3.1 ระบบประสาทส่วนกลาง 12
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของตา 13
รูปที่ 3.3 สรีระกายวิภาคของหู 15
รูปที่ 3.4 Semicircular canal, utricle, saccule 15
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของเซลล์ขน และการทำงาน 17
รูปที่ 3.6 ระนาบของ Semicircular canal 17
รูปที่ 3.7 Crista ampullaris 18
รูปที่ 3.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของ endolymph 19
รูปที่ 3.9 การวางตัวของ utricle และ saccule 21
รูปที่ 3.10 Macula 21
รูปที่ 3.11 การวัดความเร่งของ utricle otolith 22
รูปที่ 4.1 จำลองการเคลื่อนที่ด้วยการเอียงเบาะนั่งขณะจำลองความเร่งของรถยนต์ 25
รูปที่ 4.2 รถยนต์ที่ทดลอง 27
รูปที่ 4.3 ความเร่งด้านหน้ารถที่วัดได้ 27
รูปที่ 4.4 ความเร่งด้านข้างรถที่วัดได้ 28
รูปที่ 4.5 ขนาดของมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า 29
รูปที่ 4.6 ขนาดของมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง 29
รูปที่ 4.7 ความเร็วเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า 30
รูปที่ 4.8 ความเร็วเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง 30
รูปที่ 4.9 ความเร่งเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า 31
รูปที่ 4.10 ความเร่งเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง 31
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน 33

หน้า

รูปที่ 4.12 การวางแกนบนศีรษะมนุษย์ 34
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการเลือกจุดหมุน 37
รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของกลไกสำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 39
รูปที่ 4.15 กลไกแบบสจ๊วจ 40
รูปที่ 4.16 กลไกขนาน 3-UPU 41
รูปที่ 4.17 กลไก CMS 41
รูปที่ 4.18 กลไกแบบ 5 องศาอิสระ 42
รูปที่ 4.19 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่จากกลไก CMS 43
รูปที่ 4.20 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านหน้า 43
รูปที่ 4.21 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านข้าง 44
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 46
รูปที่ 5.2 กลไกจำลองความเร่งในแนวดิ่ง 46
รูปที่ 5.3 โครงสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 47
รูปที่ 5.4 ความยาวของก้านต่อแต่ละชิ้น 48
รูปที่ 5.5 การคำนวณหาแรงที่เกิดจากความเร่งด้านหน้าและความเร่งด้านข้างด้วยโปรแกรม simulink 49
รูปที่ 5.6 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขับการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z 50
รูปที่ 5.7 Free body diagram ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 50
รูปที่ 5.8 แรงภายในที่จุด B 51
รูปที่ 5.9 แรงภายในของจุด J 52
รูปที่ 5.10 แรงภายในของจุด D 52
รูปที่ 5.11 โมเมนต์ภายในที่จุด J 53
รูปที่ 5.12 โมเมนต์ภายในที่จุด D 53
รูปที่ 5.13 ก้านต่อ ABJK 54
รูปที่ 5.14 ก้านต่อ BC 54
รูปที่ 5.15 ก้านต่อ CDI 55
รูปที่ 5.16 ก้านต่อ JDE 55
รูปที่ 5.17 ก้านต่อ EF 55
รูปที่ 5.18 ก้านต่อ FGHI 56
รูปที่ 5.19 โครงสร้างกลไกส่วนหมุนหลังจากเสริมความแข็งแรง 56
รูปที่ 5.20 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของก้านต่อ EF 57
รูปที่ 5.21 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของก้านต่อ ABJK 57
รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์ความเค้นของก้านต่อ CDI 58

หน้า

รูปที่ 5.23 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของก้านต่อ BC 58
รูปที่ 5.24 การวิเคราะห์ความเค้นของก้านต่อ JDE 59
รูปที่ 5.25 จุดที่ใส่แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้าง 60
รูปที่ 5.26 แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์ 60
รูปที่ 5.27 แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านข้างของรถยนต์ 61
รูปที่ 5.28 กลไกการขับมุม *Pitch* รูปแบบที่ 1 62
รูปที่ 5.29 กลไกการขับมุม *Pitch* รูปแบบที่ 2 62
รูปที่ 5.30 แรงขับในการเคลื่อนที่ของกลไกแบบที่ 1 64
รูปที่ 5.31 แรงขับในการเคลื่อนที่ของกลไกแบบที่ 2 64
รูปที่ 5.32 กลไกขับมุม *Roll* 65
รูปที่ 5.33 แรงในการขับมุม *Roll* 66
รูปที่ 5.34 แรงในการขับกลไก Z 67
รูปที่ 5.35 กลไกขับการเคลื่อนที่ในแนว Z 68
รูปที่ 5.36 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 68
รูปที่ 5.37 ขนาดของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 68
รูปที่ 6.1 กลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่กับกลไกสมมูล 69
รูปที่ 6.2 การกำหนดเฟรมให้กับกลไกสมมูล 70
รูปที่ 6.3 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์ 74
รูปที่ 6.4 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านข้างของรถยนต์ 75
รูปที่ 6.5 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งในแนวดิ่ง 76
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของต้นแบบขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 78
รูปที่ 7.2 โครงสร้างโดยรวมของต้นแบบขนาดย่อส่วน 79
รูปที่ 7.3 ก้านต่อ A 79
รูปที่ 7.4 ก้านต่อ B 80
รูปที่ 7.5 ก้านต่อ C 80
รูปที่ 7.6 ก้านต่อ D 80
รูปที่ 7.7 ก้านต่อ E 80
รูปที่ 7.8 ก้านต่อ F 81
รูปที่ 7.9 กลไกส่วนหมุนของต้นแบบขนาดย่อส่วน 81
รูปที่ 7.10 ส่วนขับเคลื่อนมุม *Pitch* ของต้นแบบขนาดย่อส่วน 82
รูปที่ 7.11 ส่วนขับเครื่องมุม *Roll* 82
รูปที่ 7.12 ส่วนขับเคลื่อนมุม *Roll* ของต้นแบบขนาดย่อส่วน 83
รูปที่ 7.13 ส่วนขับเคลื่อนมุม *Roll* ของต้นแบบขนาดย่อส่วนที่สร้าง 83

หน้า

รูปที่ 7.14 ส่วนขับเคลื่อนในแนวดิ่งของต้นแบบขนาดย่อส่วน 84
รูปที่ 7.15 ส่วนขับเคลื่อนในแนวดิ่งของต้นแบบขนาดย่อส่วน 85
รูปที่ 7.16 ต้นแบบขนาดย่อส่วนเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่สร้าง 85
รูปที่ 7.17 ไดอะแกรมของการควบคุมต้นแบบขนาดย่อส่วนเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 86
รูปที่ 7.18 ตำแหน่งการติดตั้งเอ็นโคดเดอร์ 87
รูปที่ 7.19 ไดอะแกรมการเขียนโปรแกรม 88
รูปที่ 7.20 จำลองความเร่งด้านหน้า 6 เมตร/วินาที^{2} 90
รูปที่ 7.21 จำลองความหน่วงด้านหน้า 6 เมตร/วินาที^{2} 90
รูปที่ 7.22 จำลองความเร่ง และความหน่วงด้านหน้า 6 เมตร/วินาที^{2} 91
รูปที่ 7.23 จำลองความเร่งด้านข้าง 6 เมตร/วินาที^{2} 91
รูปที่ 7.24 จำลองความเร่งด้านข้าง -6 เมตร/วินาที^{2} 92
รูปที่ 7.25 จำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้าง 6 เมตร/วินาที^{2} 92
รูปที่ 7.26 จำลองความหน่วงด้านหน้า และความเร่งด้านข้าง 6 เมตร/วินาที^{2} 93
รูปที่ 7.27 เคลื่อนที่ในแนวแกนรัศมี 60 มิลลิเมตร 93
รูปที่ 8.1 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ 96
รูปที่ 8.2 ต้นแบบขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ 96
รูปที่ ก.1 มอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Maxon รุ่น Re-max 273166 102
รูปที่ ก.2 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Copley รุ่น 4122P 103
รูปที่ ก.3 มอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น KP43 104
รูปที่ ก.4 ชุดขับมอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MR-J3-40A 105
รูปที่ ก.5 การ์ดควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ National instruments รุ่น PCI-7344 106
รูปที่ ข.1 โปรแกรมส่วนกำหนดเงื่อนไขและตำแหน่งการเคลื่อนที่ 107
รูปที่ ข.2 โปรแกรมส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ 108
รูปที่ ข.3 หน้าจอแสดงผลการทำงานของโปรแกรม 109
รูปที่ ข.4 โปรแกรมคำนวณค่าความเร่งเป็นตำแหน่งเคลื่อนที่ของมุม *Pitch* และมุม *Roll* 109
รูปที่ ค.1 ก้านต่อ FGHI 110
รูปที่ ค.2 ก้านต่อ EF 110
รูปที่ ค.3 ก้านต่อ BC 111
รูปที่ ค.4 ก้านต่อ CDI 111
รูปที่ ค.5 ก้านต่อ BC 112
รูปที่ ค.6 ก้านต่อ ABJK 112