

ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์

นายปริญญา วัฒนกุลชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SCALING VEHICLE FOR DYNAMIC SIMULATION

Mr.Parinya Wattananukulchai

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511733

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองทาง
พลศาสตร์

โดย

นายปริญญา วัฒนนกุลชัย

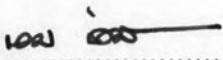
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์

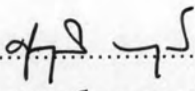
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

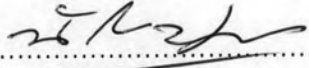

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์)

ปริญญา วัฒนคุณุรักษ์ : ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์.
(A SCALING VEHICLE FOR DYNAMIC SIMULATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, 275หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาออกแบบและพัฒนายานพาหนะจริงแบบย่อส่วน สำหรับการจำลองทางพลศาสตร์ โดยใช้หลักการทางวิศวกรรมพัฒนาให้มีพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์สมมูลกับพลศาสตร์ของยานพาหนะจริง โดยมุ่งใช้ต้นแบบนี้ในการจำลองความเสมือนจริงในสภาพแวดล้อมย่อส่วนร่วมกับมนุษย์ การออกแบบได้ยึดตามหลักทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงมิติและวิธีการจัดกลุ่มของตัวแปรไร้มิติ รวมถึงการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลบนตัวยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน เช่น ความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน x, y, z ความเร็วที่ล้อและมุมเลี้ยวที่ล้อ, ภาพการเคลื่อนที่จากกล้องวีดีโอ, อุปกรณ์ส่งข้อมูลแบบไร้สาย ซึ่งตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะต้องสอดคล้องกับทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงมิติและวิธีการจัดกลุ่มของพಾಯ เพื่อให้มีพลศาสตร์ที่คล้ายคลึงกับยานพาหนะจริง นอกจากนี้ในกระบวนการพัฒนา ได้สร้างอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบสำหรับปรับวัดค่าต่างๆเช่น โมเมนต์แกนเฉื่อย และ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งเลี้ยวของยางรถ และได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สองมิติสำหรับทำนายพฤติกรรมของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน โดยทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงและการขับเป็นวงกลม โดยได้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....อ.วิ.อ.1.....วัฒนคุณุรักษ์.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2551

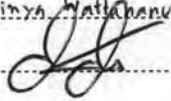
4870599021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Buckingham PI's theorem / dimensionless analysis / similarity

PARINYA WATTANANUKULCHAI: A SCALING VEHICLE FOR DYNAMIC SIMULATION. ADVISOR: ASST.PROF.WITAYA WANNASUPHOPRASIT, 275pp.

This research describes a study and development of a scaled vehicle. The scaled vehicle has engineered to have dynamic behaviors equivalent to those of real vehicle. The main purpose is to use the scaled vehicle in a scaling environment interactively with human operator. The scaled vehicle is designed and constructed based on dimensionless analysis and PI's theorem. Essential parameters are carefully adjusted to have dynamic similarity equivalent with real scaled vehicle. The prototype equipped with sensors, instrument, wireless communication system, controller, and vision on board. Several measurement devices were developed for measuring moment of inertia, and cornering stiffness coefficients. In this work, a 2D dynamic model is applied to predict the behavior of the vehicle. We set up two experiments on the scaled vehicle prototype. We tested the scaled vehicle in skid pad and lane change experiments. The experimental results are provided and discussed.

Department : ...Mechanical Engineering...
Field of Study : ...Mechanical Engineering...
Academic Year : ...2008.....

Student's Signature Parinya Wattananukulchai
Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความเมตตาและกรุณาที่ท่านอาจารย์มีต่อตัวข้าพเจ้า ทั้งในด้านวิชาการและจริยธรรมอันดีงาม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานร่วมกับคนอื่นทั้งในงานวิจัยและในการดำเนินชีวิตในอนาคตภาคหน้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.รัชทิน จันทรเจริญ ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ จันทรานุกัณณ์ และ อ.ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ เป็นอย่างสูง ที่ให้ความเอื้อเฟื้อและคำแนะนำในการวิจัยชิ้นนี้ จนกระทั่งได้ผลสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยชิ้นนี้

และขอขอบพระคุณท่านประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้สละเวลาเพื่อตรวจทานงานวิจัยครั้งนี้จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผลสัมฤทธิ์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบเป็นพระคุณอันยิ่งใหญ่ของบิดา-มารดา คุณวิษณุ – คุณอุไรวรรณ วัฒนนุกุลชัย คุณครู อาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมไปถึง นาย กมล จิ่งเสถียรทรัพย์ ที่ช่วยเหลือในเรื่องการเขียนโปรแกรมควบคุม เพื่อนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้องที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านผู้สนใจจะได้รับประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษางานวิจัยเล่มนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.3 จุดประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการทำงานของยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วน.....	4
2.2 ยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วนแบบต่างๆ.....	4
2.3 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3.1 The Illinois roadway simulator - a hardware-in-the-loop testbed for vehicle dynamics and control.....	5
2.3.2 Design of an automated vehicle integrated control instrument....	7
2.3.3 Scale-model vehicle analysis for the design of a steering controller.....	8
2.3.4 Real-time video-based monitoring of vehicle position and orientation within an automated vehicle framework.....	9

2.3.5 Scale tire modeling and experimentation on a rolling roadway simulator.....	9
2.3.6 Vehicle similitude modeling and validation of the Pennsylvania State University rolling roadway simulator.....	10
2.3.7 Development of a scaled vehicle with longitudinal dynamics of a HMMWV for ITS testbed.....	11
บทที่ 3 แบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะ.....	16
3.1 สมการพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ.....	16
3.2 สมการพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 4 ล้อ.....	22
บทที่ 4 การวิเคราะห์เชิงมิติ สภาพความคล้ายและการประยุกต์.....	25
4.1 มิติของหน่วย.....	25
4.2 การวิเคราะห์เชิงมิติ.....	26
4.2.1 ทฤษฎี Buckingham- π	26
4.3 การวิเคราะห์สภาพความคล้าย.....	28
4.3.1 สภาพความคล้ายทางเรขาคณิต.....	28
4.3.2 สภาพความคล้ายทางจลนศาสตร์.....	29
4.3.3 สภาพความคล้ายทางพลศาสตร์.....	30
4.4 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี Buckingham- π กับพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ.....	30
4.5 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี Buckingham- π กับพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 4 ล้อ.....	33
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	39
5.1 การออกแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	40
5.1.1 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น.....	42
5.1.2 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วเชิงเส้นตำแหน่งล้อ.....	43
5.1.3 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วเชิงมุม.....	44
5.1.4 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดมุมบังคับล้อ.....	45
5.1.5 การออกแบบติดตั้งกล้อง.....	46
5.1.6 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ส่งข้อมูลไร้สาย.....	49
5.1.7 รูปแบบโดยรวมของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด.....	50
5.2 การสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	51

	หน้า
5.2.1 การกำหนดและเลือกอุปกรณ์.....	51
5.2.1.1 การเลือกยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	51
5.2.1.2 การเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นและความเร็ว เชิงมุม.....	56
5.2.1.3 การเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วของล้อ.....	57
5.2.1.4 การเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดมุมบังคับเลี้ยว.....	58
5.2.1.5 การเลือกอุปกรณ์ตัวควบคุมหลัก.....	59
5.2.1.6 การเลือกอุปกรณ์ตัวส่งข้อมูลแบบไร้สาย.....	60
5.2.1.7 การเลือกอุปกรณ์ตัวส่งภาพการเคลื่อนที่แบบไร้สาย.....	61
5.2.2 ขั้นตอนการติดตั้ง.....	62
5.2.2.1 การติดตั้งชุดวัดความเร็วที่ล้อ.....	62
5.2.2.1.1 การติดตั้งแม่เหล็กที่ล้อ.....	62
5.2.2.1.2 การติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์.....	63
5.2.2.2 การติดตั้งชุดวัดมุมเลี้ยว.....	64
5.2.2.3 การติดตั้งชุดวัดความเร่งเชิงเส้น ชุดรับ-ส่งข้อมูลไร้สายและชุด ประมวลผล.....	65
5.2.2.4 การติดตั้งอุปกรณ์ชุดส่งภาพเคลื่อนไหว.....	66
บทที่ 6 ระบบควบคุมบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	67
6.1 ระบบประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์.....	68
6.2 การอ่านค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม.....	69
6.2.1 การทำงานของ Crossbow รุ่น MNAV100CA.....	69
6.2.2 การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิง เส้นและความเร็วเชิงมุม.....	70
6.3 การวัดความเร็วล้อ.....	72
6.4 การวัดมุมเลี้ยว.....	73
6.5 การรับ-ส่ง ข้อมูลผ่านชุดวงจรสื่อสารไร้สาย.....	73
6.6 การควบคุมยานพาหนะ.....	75
6.6.1 การควบคุมความเร็วยานพาหนะ.....	75
6.6.2 การควบคุมมุมเลี้ยว.....	77

	หน้า
6.6.3 การควบคุมเกียร์.....	77
6.7 การทำงานของระบบโปรแกรมควบคุม.....	77
บทที่ 7 การวัดและปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ.....	80
7.1 การหาจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	81
7.2 การหาและปรับแต่งค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวยานพาหนะรอบแกน z.....	84
7.2.1 การทดลองในกรณีไม่มียานพาหนะบนอุปกรณ์วัด.....	86
7.2.2 การทดลองในกรณีมียานพาหนะบนอุปกรณ์วัด.....	88
7.3 การหาและปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน.....	92
7.3.1 แบบจำลองของล้อ.....	92
7.3.2 อุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด.....	93
7.3.3 การต่อใช้อุปกรณ์.....	95
7.3.4 ชุดทดสอบการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน.....	95
7.3.5 การควบคุมมุมเลี้ยว.....	97
7.3.6 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน.....	97
7.4 ข้อมูลจากยานพาหนะจริง.....	102
7.5 สรุปผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน..	104
บทที่ 8 การวัดและปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 4 ล้อ.....	105
8.1 การหาค่าหมุมวัดที่ 1.....	105
8.2 การหาค่าหมุมวัดที่ 2.....	106
8.3 การหาค่าหมุมวัดที่ 3.....	108
8.4 การหาค่าหมุมวัดที่ 4.....	108
8.5 การหาค่าหมุมวัดที่ 5.....	109
8.5.1 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งที่ยางล้อกระทำกับผิวถนน.....	109
8.5.2 การหาสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งที่ยางล้อกระทำกับตัวยานพาหนะ.....	110
8.6 การหาค่าหมุมวัดที่ 6.....	115
8.6.1 วิธีแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นระยะทางการเคลื่อนที่.....	117
8.6.2 ระบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง.....	119
8.6.3 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง.....	123

	หน้า
8.6.3.1 กรณีล้อหน้า แหนบ 5 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	123
8.6.3.2 กรณีล้อหน้า แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	126
8.6.3.3 กรณีล้อหลัง แหนบ 5 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	127
8.6.3.4 กรณีล้อหลัง แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	127
8.6.3.5 กรณีล้อหน้า แหนบ 3 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	128
8.6.3.6 กรณีล้อหน้า แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	128
8.6.3.7 กรณีล้อหลัง แหนบ 3 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	129
8.6.3.8 กรณีล้อหลัง แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	129
8.6.3.9 กรณีล้อหลัง แหนบ 3 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 2.....	130
8.6.3.10 กรณีล้อหลัง แหนบ 3 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 2.....	130
8.6.3.11 กรณีล้อหน้า แหนบ 1 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	131
8.6.3.12 กรณีล้อหน้า แหนบ 1 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	131
8.6.3.13 กรณีล้อหลัง แหนบ 1 แผ่น มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	132
8.6.3.14 กรณีล้อหน้า แหนบ 5 แผ่น ไม่มีล้อ สปริงชนิดที่ 1.....	132
8.7 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของควมถี่ระบบช่วงล่าง.....	134
8.8 การทดสอบหลังปรับแต่งโดยใช้กรณีไม่มีสปริง และแหนบ 2 แผ่น.....	135
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง.....	137
9.1 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน	138
9.1.1 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะหยุดนิ่ง.....	138
9.1.2 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะเคลื่อนที่.....	138
9.2 การทดสอบความสมมูลทางพลศาสตร์ของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	140
9.2.1 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลม.....	141
9.2.2 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลน.....	147
9.2.3 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบซิกแซ็ก.....	153
9.2.4 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลมเมื่อกำหนดค่าค่ามุมลื่นไถลไม่เกิน 5 องศา.....	158
9.2.5 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนเมื่อกำหนดค่าค่ามุมลื่นไถลไม่เกิน 5 องศา.....	162
9.3 สรุปผลการทดลอง.....	167

	หน้า
บทที่ 10 วิเคราะห์ สรุปผลการออกแบบ การทดลองและข้อเสนอแนะ.....	168
10.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	168
10.1.1. การทดลองการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะจริงแบบ ย่อยส่วน.....	168
10.1.2. การทดลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะจริงแบบย่อยส่วน.....	169
10.2 สรุปผลการออกแบบและการปรับแต่ง.....	171
10.3 สรุปผลการทดลอง.....	171
10.4 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง.....	172
รายการอ้างอิง.....	173
ภาคผนวก ก. การทดสอบมุมเลี้ยวของยานพาหนะกับสัญญาณที่สั่ง.....	176
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยาล้อกระทำกับผิวถนนแต่ ละแบบ.....	185
ข.1 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 1.....	186
ข.2 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 1.....	187
ข.3 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 1.....	188
ข.4 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 1.....	189
ข.5 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 2 มียางใน และถนนแบบ 2.....	190
ข.6 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 2.....	191
ข.7 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 2.....	192
ข.8 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบที่ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 2.....	193
ข.9 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 2.....	194
ข.10 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 3.....	195
ข.11 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 3.....	196
ข.12 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 3.....	197
ข.13 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 3.....	198
ข.14 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 4.....	199
ข.15 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 มียางใน และถนนแบบ 4.....	200
ข.16 การทดลองกรณีล้อหน้าแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 4.....	201
ข.17 การทดลองกรณีล้อหลังแบบ 1 ไม่มียางใน และถนนแบบ 4.....	202

	หน้า
A Scaling Vehicle for Dynamic Simulation.....	245
Essential Parameter for Dynamically Scaling Vehicle:.....	251
Equivalent Dynamic Scaling System for Real Vehicle.....	257
Scaled Vehicle for Interactive Dynamic Simulation (SIS).....	263
Experimental study of 2 D Model on a Scaled Vehicle.....	269
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	275

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา..... 13
2.2	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)..... 14
2.3	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)..... 15
4.1	มิติของหน่วยตัวแปร..... 25
5.1	คุณสมบัติตัวต้านทานปรับค่าได้ของ Vishay Spectrol รุ่น 140..... 58
5.2	ข้อมูลจำเพาะของตัวรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย..... 61
6.1	รายละเอียดข้อมูลแต่ละไบต์ของเซนเซอร์ Crossbow..... 70
6.2	รายละเอียดข้อมูลแต่ละไบต์ในการรับคำสั่งเป็นดังนี้..... 74
6.3	รายละเอียดข้อมูลแต่ละไบต์ในการส่งข้อมูลกลับเป็นดังนี้..... 74
7.1	ข้อมูลยานพาหนะจริงสำหรับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2..... 81
7.2	เปรียบเทียบความสมมูลของตัวแปรไร้มิติกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2..... 84
7.3	ผลการทดลองโดยกว้าง 9.25 ครั้ง..... 86
7.4	ผลการทดลองโดยกว้าง 14.25 ครั้ง..... 87
7.5	ผลการทดลองโดยกว้าง 19.25 ครั้ง..... 87
7.6	ผลการทดลองโดยเปลี่ยนชนิดของเชือก..... 88
7.7	ผลการทดลองยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนก่อนปรับแต่ง..... 89
7.8	ข้อมูลยานพาหนะจริงสำหรับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ กลุ่มที่ 5..... 90
7.9	ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ยางล้อกระทำกับผิวถนนแต่ละแบบ..... 91
7.10	ข้อมูลยานพาหนะจริงที่เลือกสำหรับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4.... 102
7.11	ความเร็วของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเมื่อให้กลุ่มตัวแปรไร้มิติสมมูลกับกลุ่มยานพาหนะจริง..... 103
7.12	ค่าข้อมูลจำเพาะระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและยานพาหนะจริง..... 104
7.13	ค่าข้อมูลกลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและยานพาหนะจริง..... 104
8.1	ผลการทดลองหาค่า K ของล้อ..... 110
8.2	สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่ง..... 115

	หน้า
8.3	ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ต่อค่าศักย์ไฟฟ้า..... 118
8.4	สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความความแข็งเกร็งและความหน่วง..... 133
9.1	เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดและการคำนวณ..... 139
9.2	เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบวงกลม.. 143
9.3	เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบวงกลม..... 145
9.4	ผลการทดลองในกรณีเคลื่อนที่แบบวงกลม..... 146
9.5	เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบเปลี่ยน เลน..... 149
9.6	เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบเปลี่ยนเลน..... 151
9.7	ผลการทดลองในกรณีแบบเปลี่ยนเลน..... 152
9.8	เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบซิกแซ็ก.. 155
9.9	เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบซิกแซ็ก..... 156
9.10	ผลการทดลองในกรณีแบบซิกแซ็ก..... 157
9.11	เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ในการทดสอบวงกลมกรณีมุมลื่นไกล น้อย..... 159
9.12	เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างในการทดสอบวงกลมกรณีมุมลื่นไกลน้อย..... 161
9.13	ผลการทดลองแบบเคลื่อนที่วงกลมกรณีมุมลื่นไกลน้อย..... 162
9.14	เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ทดสอบเปลี่ยนเลนกรณีมุมลื่นไกลน้อย 163
9.15	เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างในการทดสอบเปลี่ยนเลนกรณีมุมลื่นไกลน้อย..... 165
9.16	ผลการทดลองแบบเปลี่ยนเลนกรณีมุมลื่นไกลน้อย..... 166
10.1	ค่าข้อมูลจำเพาะระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและยานพาหนะจริง..... 168
10.2	ค่าข้อมูลกลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและยานพาหนะ จริง..... 169
10.3	สรุปข้อมูลจากการทดลองกรณีค่ามุมลื่นไกลไม่เกิน 10 องศา..... 170
10.4	สรุปข้อมูลจากการทดลองกรณีค่ามุมลื่นไกลไม่เกิน 5 องศา..... 170
ก.1	การทดลองครั้งที่ 1 เพิ่มค่า PWM ที่ละ 10 ค่า ในช่วง 350-570..... 178
ก.2	การทดลองครั้งที่ 2 เพิ่มค่า PWM ที่ละ 10 ค่า ในช่วง 380-200..... 180
ก.3	การทดลองครั้งที่ 3 เพิ่มค่า PWM ที่ละ 10 ค่า ในช่วง 200-550..... 182
ก.3	การทดลองครั้งที่ 3 เพิ่มค่า PWM ที่ละ 10 ค่า ในช่วง 200-550 (ต่อ)..... 183

	หน้า
ข.1	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 1..... 186
ข.2	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 2..... 187
ข.3	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 3..... 188
ข.4	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 4..... 189
ข.5	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 5..... 190
ข.6	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 6..... 191
ข.7	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 7..... 192
ข.8	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 8..... 193
ข.9	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 9..... 194
ข.10	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 10..... 195
ข.11	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 11..... 196
ข.12	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 12..... 197
ข.13	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 13..... 198
ข.14	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 14..... 199
ข.15	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 15..... 200
ข.16	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 16..... 201
ข.17	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 17..... 202
ข.18	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 18..... 203
ข.19	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 19..... 204
ข.20	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 20..... 205
ข.21	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 21..... 206
ข.22	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 22..... 207
ข.23	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 23..... 208
ข.24	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 24..... 209
ข.25	ค่าเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 25..... 210
ค.1	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1..... 212
ค.2	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2..... 213
ค.3	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3..... 214
ค.4	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 4..... 215

	หน้า
ค.5	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 5..... 216
ค.6	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 6..... 217
ค.7	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 7..... 218
ค.8	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 8..... 219
ค.9	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 9..... 220
ค.10	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 10..... 221
ค.11	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 11..... 222
ค.12	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 12..... 223
ค.13	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 13..... 224
ค.14	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 14..... 225
ค.15	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 15..... 226
ค.16	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 16..... 227

สารบัญญภาพ

	หน้า
2.1 ระบบการทำงานทั้งหมด.....	6
2.2 แขนข้อต่อสำหรับวัดตำแหน่ง.....	6
2.3 ระบบการทำงานของ Davinci.....	7
2.4 ระบบการทำงานของ Hoblet, Philip.....	8
2.5 ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนของ Lejo Buning.....	9
2.6 ล้อของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนของ Andrew T.Glumac.....	11
2.7 การทดลองยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนของ Sittikorn Lapapong.....	11
2.8 ระบบของยานพาหนะจริงที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบระบบควบคุม.....	11
2.9 ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนของ Rajeev Verma.....	12
3.1 แรงต่างๆในแบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะ 2 ล้อ.....	17
3.2 แบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะ 4 ล้อ.....	22
3.3 แผนภาพวัตถุอิสระขณะที่ยานพาหนะกำลังเลี้ยว (มุมมองด้านบน).....	22
4.1 ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (ซ้าย) ต้นแบบ และ (ขวา) แบบจำลอง.....	28
4.2 ความคล้ายทางจลนศาสตร์ขณะของไหล ไหลท่วมทรงกระบอก.....	29
4.3 ความคล้ายทางพลศาสตร์ระหว่างต้นแบบและแบบจำลอง.....	30
5.1 แนวความคิดในการออกแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	39
5.2 แบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนตามทีออกแบบ.....	40
5.3 วงจรการทำงานรวมของระบบที่ออกแบบไว้.....	41
5.4 ออกแบบตำแหน่งแผ่นรองติดตั้งอุปกรณ์.....	42
5.5 การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง.....	42
5.6 ออกแบบตำแหน่งติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์.....	43
5.7 ออกแบบขนาดตำแหน่งติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์(ต่อ).....	44
5.8 ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วเชิงมุม.....	44
5.9 ออกแบบการติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้.....	45
5.10 ตำแหน่งการติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้.....	45
5.11 สายตาของผู้ขับขี่ยานพาหนะ.....	46
5.12 พื้นที่มุมมองของกล้อง FOV40 FOV60 และ FOV100.....	47
5.13 การใช้กล้องสองตัว.....	47

	หน้า
5.14	แสดงระยะของผู้ขับขี่และฉากรับภาพ..... 48
5.15	ออกแบบติดตั้งกล้อง..... 49
5.16	ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ส่งข้อมูลแบบไร้สาย..... 49
5.17	การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด..... 50
5.18	รถ TAMIYA รุ่น Ford F350 High-Lift..... 51
5.19	โครงสร้างของ TAMIYA รุ่น Ford F-350..... 51
5.20	ชุดเฟืองขับของ TAMIYA รุ่น Ford F-350..... 52
5.21	อัตราส่วนการเปลี่ยนเกียร์ของ TAMIYA รุ่น Ford F-350..... 52
5.22	โครงสร้างของระบบรองรับการสั่นสะเทือน 52
5.23	มอเตอร์ Mabuchi Motor รุ่น RS-540SH..... 53
5.24	ลักษณะโครงสร้างมอเตอร์ Mabuchi Motor รุ่น RS-540SH..... 53
5.25	ชุดขับเคลื่อน 4 ล้อ..... 54
5.26	ชุดควบคุมความเร็ว..... 54
5.27	ลักษณะเซอร์โวมอเตอร์ของ Futaba รุ่น S3003 55
5.28	ทิศทางแกนของ Crossbow รุ่น UNAV 100CA..... 56
5.29	แผนผังการทำงานภายในของ Crossbow รุ่น UNAV 100CA..... 56
5.30	ฮอลล์เซนเซอร์ของ ALLEGRO รุ่น A1302 57
5.31	ตัวต้านทานปรับค่าได้ของ Vishay Spectrol รุ่น 140..... 58
5.32	ขนาดของตัวต้านทานปรับค่าได้..... 58
5.33	ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ I-nex รุ่น JX-dsPIC40..... 59
5.34	ชุดตัวรับ-ส่งข้อมูลที่จะติดตั้งบนตัวยานพาหนะ..... 61
5.35	กล้องของ BWAV รุ่น KX141..... 61
5.36	กล้องและชุดส่งภาพไร้สาย..... 62
5.37	แผ่นที่ทำการติดตั้งแม่เหล็ก..... 62
5.38	ล้อที่ทำการติดตั้งแม่เหล็ก..... 63
5.39	ตำแหน่งติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์ที่แกนล้อ..... 63
5.40	ตำแหน่งชุดวัดความเร็วที่ล้อ..... 64
5.41	การวิเคราะห์สัญญาณจากฮอลล์เซนเซอร์..... 64
5.42	ตำแหน่งชุดวัดมุมล้อ..... 64

	หน้า	
5.43	ตำแหน่งอุปกรณ์ชั้นล่าง (ชาย) อุปกรณ์ชั้นบน (ขวา).....	65
5.44	ตำแหน่งกล่องควบคุม.....	65
5.45	ตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว.....	66
6.1	ระบบการทำงานรวมบนตัวยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	67
6.2	การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	68
6.3	ทิศทางของ IMU ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ.....	69
6.4	รูปแบบการทำงานของฮอลล์เซ็นเซอร์เมื่อผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	72
6.5	การวัดช่วงการทำงานของฮอลล์เซ็นเซอร์ผ่านออสซิลอโคป.....	72
6.6	การต่อวงจรทางไฟฟ้าระหว่างตัวประมวลผล และอุปกรณ์วัดมุมล้อที่เลี้ยง.....	73
6.7	แสดงช่วงสัญญาณพัลส์วิตช์มอเตอร์.....	76
6.8	ระบบควบคุมของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและระบบควบคุมภายนอก.....	78
7.1	ข้อมูลกลุ่มตัวแปรไรมิติกกลุ่มที่ 1 ของยานพาหนะจริง.....	81
7.2	ตำแหน่งของความยาวระหว่างเพลลาของล้อหน้าและเพลลาล้อหลัง	82
7.3	กำหนดตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ.....	82
7.4	การแขวนจุดศูนย์ถ่วงตามตำแหน่งที่กำหนด.....	83
7.5	การแขวนจุดศูนย์ถ่วงหลังจากย้ายอุปกรณ์.....	83
7.6	การแขวนจุดศูนย์ถ่วงหลังจากเพิ่มมวลไปด้านหน้า.....	83
7.7	อุปกรณ์หาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	84
7.8	แสดงมุมวัดในการทดลอง.....	86
7.9	การทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	88
7.10	ข้อมูลกลุ่มตัวแปรไรมิติกกลุ่มที่ 5 ของยานพาหนะจริง.....	89
7.11	ยานพาหนะแบบย่อส่วนหลังปรับแต่ง.....	90
7.12	การปรับแต่งในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงาน.....	91
7.13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่กระทำที่ล้อและค่ามุมลื่นไถลด้านข้างของล้อ.....	92
7.14	ทิศทางของแรงที่กระทำต่อล้อ.....	93
7.15	แสดงขนาดของเซ็นเซอร์วัดแรง/แรงบิด.....	94
7.16	แสดงการต่อเชื่อมเซ็นเซอร์วัดแรง/แรงบิด.....	95
7.17	โครงสร้างอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่ออกแบบในส่วนของล้อ.....	96

	หน้า	
7.18	ชุดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานด้านข้างของล้อที่สร้างขึ้นมา.....	96
7.19	ล้อที่ใช้ทดสอบ.....	97
7.20	ขั้นตอนเริ่มต้นการทดสอบ.....	98
7.21	ขั้นตอนให้แรงกดลงที่ล้อ.....	98
7.22	แสดงการคำนวณแรงกดที่ล้อ.....	99
7.23	พื้นผิวถนนที่ใช้ทดสอบ.....	100
7.24	กลุ่มตัวแปรไร้มิติเฉลี่ยกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 ของยานพาหนะจริง.....	102
8.1	การวัดความสูงของยานพาหนะ แขนงด้านหน้า(ขวา) และแขนงด้านหลัง(ซ้าย).	107
8.2	การหาค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวรถรอบแกน y(ซ้าย) และแกน x(ขวา).....	108
8.3	การทดลองหาค่า K ของล้อ.....	109
8.4	แรงกดต่อระยะยุบตัวของล้อ.....	110
8.5	คุณลักษณะของตัวด้านทานชนิด B.....	111
8.6	ระยะการเคลื่อนที่ต่อค่าสัญญาณนอกเป็นดิจิตอล.....	111
8.7	การบันทึกค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์..	112
8.8	แผน 5 แผ่นก่อนทำการแยกชิ้น.....	112
8.9	แผน 5, 3 และ 1 แผ่น ก่อนประกอบทำการทดลอง.....	113
8.10	สปริงระบบรองรับแบบที่ 1 (ซ้าย) และแบบที่ 2 (ขวา).....	113
8.11	การทดลองหาค่า K ของยานพาหนะ.....	113
8.12	ตำแหน่งที่ตั้งด้วยตราขงสปริง(ซ้าย) ตำแหน่งตัววัดการเคลื่อนที่(ขวา).....	114
8.13	การทดลองหาค่า c ผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์.....	116
8.14	การทดสอบหาค่า c กรณีไม่มีล้อ(ซ้าย) และกรณีมีล้อ(ขวา).....	116
8.15	ผลการทดสอบหาค่า c ผ่านทางออสซิลโลสโคป.....	117
8.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของตัว ด้านทาน.....	118
8.17	รูปแบบจำลองสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ของยานพาหนะ.....	119
8.18	รูปแสดงผลตอบสนองของระบบอันดับสอง.....	122
8.19	ผลที่ได้จากออสซิลโลสโคปในการทดลองที่ 1.....	124
8.20	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยการเคลื่อนที่.....	124
8.21	ผลการทดลองเมื่อผ่านการกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	125

	หน้า	
8.22	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 1.....	125
8.23	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 2.....	126
8.24	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 3.....	127
8.25	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 4.....	127
8.26	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 5.....	128
8.27	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 6.....	128
8.28	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 7.....	129
8.29	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 8.....	129
8.30	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 9.....	130
8.31	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 10.....	130
8.32	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 11.....	131
8.33	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 12.....	131
8.34	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 13.....	132
8.35	ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีที่ 14.....	132
8.36	การทดลองที่ใช้แหวน 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง.....	134
8.37	ค่า K ผลทดลองที่ใช้แหวน 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง.....	135
8.38	ค่า ξ ของผลการทดลองที่ใช้แหวน 2 แผ่น และ ไม่มีสปริง.....	135
9.1	ระบบการควบคุมยานพาหนะ(ภาพขวา) และจากผู้ควบคุมภายนอก(ภาพซ้าย).	137
9.2	การทดสอบวางยานพาหนะบนพื้นเอียง.....	138
9.3	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ได้จากเซนเซอร์ขณะเคลื่อนที่เป็น วงกลม.....	140
9.4	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ได้จากเซนเซอร์ขณะเคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	140
9.5	ลักษณะเส้นทางการทดสอบของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.....	141
9.6	การทดสอบเคลื่อนที่แบบวงกลม.....	141
9.7	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$	142
9.8	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$	142
9.9	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$	142
9.10	ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z	143
9.11	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$	144

	หน้า
9.12	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$ 144
9.13	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$ 144
9.14	ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ 145
9.15	ข้อมูลค่าค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้า ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s 146
9.16	ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลน..... 147
9.17	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$ 148
9.18	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$ 148
9.19	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$ 148
9.20	ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z 149
9.21	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$ 150
9.22	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$ 150
9.23	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$ 150
9.24	ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ..... 151
9.25	ข้อมูลค่าค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้า ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s 152
9.26	การทดสอบเคลื่อนที่แบบซิกแซก..... 153
9.27	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$ 153
9.28	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$ 154
9.29	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$ 154
9.30	ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z 154
9.31	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$ 155
9.32	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$ 155
9.33	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$ 156
9.34	ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ..... 156
9.35	ข้อมูลค่าค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้า ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s 157
9.36	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$ 158
9.37	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.5\text{m/s}$ 158
9.38	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.3\text{m/s}$ 159
9.39	ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z 159
9.40	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$ 160

	หน้า
9.41	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.5\text{m/s}$ 160
9.42	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.3\text{m/s}$ 160
9.43	ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ..... 161
9.44	ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3m/s 161
9.45	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$ 162
9.46	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.5\text{m/s}$ 162
9.47	ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.3\text{m/s}$ 163
9.48	ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z..... 163
9.49	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$ 164
9.50	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.5\text{m/s}$ 164
9.51	ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.3\text{m/s}$ 164
9.52	ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ..... 165
9.53	ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3m/s 165
ก.1	ตำแหน่งระบบเลี้ยว(ซ้าย) และตัวเข้ารหัสของ KOYO (ขวา)..... 177
ก.2	การทดสอบครั้งที่ 1 แกน x คือค่า PWM และ แกน y แทนค่าระยะหน่วยของศา.. 179
ก.3	การทดสอบครั้งที่ 1 แกน x คือค่า PWM และ แกน y ค่า ADC ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์..... 179
ก.4	การทดสอบครั้งที่ 2 แกน x คือค่า PWM และ แกน y แทนค่าระยะหน่วยของศา.. 181
ก.5	การทดสอบครั้งที่ 2 แกน x คือค่า PWM และ แกน y ค่า ADC ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 181
ก.6	การทดสอบครั้งที่ 3 แกน x คือค่า PWM และ แกน y แทนค่าระยะหน่วยของศา.. 183
ก.7	การทดสอบครั้งที่ 3 แกน x คือค่า PWM และ แกน y ค่า ADC ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์..... 184
ข.1	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 1..... 186
ข.2	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 2..... 187
ข.3	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 3..... 188
ข.4	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 4..... 189
ข.5	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 5..... 190
ข.6	ความชันระหว่างมุมเลี้ยวและแรงด้านข้างของล้อหน้าการทดลองที่ 6..... 191

	หน้า
ค.11	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 11..... 222
ค.12	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 12..... 223
ค.13	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 13..... 224
ค.14	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 14..... 225
ค.15	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 15..... 226
ค.16	แสดงค่ากราฟในการทดลองกรณีที่ 16..... 227
ง.1	แบบทางเครื่องกลด้วยรวมของชุดทดสอบในส่วนของล้อ..... 229
ง.2	แผ่นตัวยึดเซนเซอร์ในส่วนของล้อตัวที่ 1..... 230
ง.3	แผ่นสำหรับหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะ..... 231
ง.4	แผ่นตัวยึดเซนเซอร์ในส่วนของล้อตัวที่ 2..... 232
ง.5	แผ่นตัวยึดของล้อ..... 233
ง.6	แผ่นตัวยึดอุปกรณ์..... 234
ง.7	ตัวยึดแกนล้อ..... 235
ง.8	แผ่นตัวยึดระหว่างเซนเซอร์และล้อ..... 236
ง.9	แผ่นหลักตัวยึดชุดเซนเซอร์..... 237
ง.10	แกนล้อในการต่ออุปกรณ์..... 238
จ.1	วงจรเชื่อมต่อของตัวประมวลผลหลักกับชุดส่งรับ-ข้อมูลไร้สายและชุด IMU..... 240
จ.2	วงจรเชื่อมต่อของตัวประมวลผลหลักกับชุดวัดความเร็วล้อ..... 241
จ.3	วงจรเชื่อมต่อของตัวประมวลผลหลักกับชุดมอเตอร์กระแสตรงและเซอร์โวมอเตอร์..... 242
จ.4	วงจรภาคจ่ายไฟฟ้าให้แก่ส่วนของอุปกรณ์..... 243