การศึกษาแบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัลเชิงการทดลอง

นาย ฤทธิกิติ์ ประไพพิชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1390-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20A40868 23 ก.ค. 2546

A STUDY OF CAR VIBRATION MODEL BY THE EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD

Mr. Ritthikit Prapaipichit

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 2001

ISBN 974-03-1390-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัลเชิงการทดลอง
โดย	นายฤทธิกิติ์ ประไพพิชิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

ฤทธิกิติ์ ประไพพิชิต : การศึกษาแบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัลเชิงการทดลอง. (A STUDY OF CAR VIBRATION MODEL BY THE EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ, 133 หน้า. ISBN 974-03-1390-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการสั่นของรถยนต์ด้วยวิธีเชิงการทดลอง อันเป็นผลเนื่องจากระบบแขวน โดยคำนึงอินพุทคือสภาพพื้นถนน และเอาท์พุทคือการสั่นตามตำแหน่งต่างๆของตัวรถและล้อรถที่คำนึงการเคลื่อนที่ 7 ระดับขั้นเสรี ข้อสมมติสำคัญคือแบบจำลองเป็นแบบจำลองวัตถุแข็งเกร็งที่เป็นเชิงเส้น การศึกษาทำได้โดยให้การเคลื่อนที่เริ่มต้นกับรถยนต์และปล่อยให้เกิดการสั่นอย่างอิสระ จากนั้นเก็บข้อมูลผลตอบสนองการสั่นเพื่อนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยหลักการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ระเบียบวิธีทำซ้ำของเกาส์-นิวตัน ซึ่งมีหลักการคือปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ภายในโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จนได้รับแบบจำลองที่ฟิตผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยวิเคราะห์แบบจำลองในสองสภาวะคือขณะที่รถยนต์ไม่มีภาระบรรทุกและมีภาระบรรทุก เพื่อเปรียบเทียบผล

ผลการทดลองพบว่า แบบจำลองที่ประเมินได้สามารถทำนายผลการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งต่างๆของตัวรถได้ดีในระดับที่น่าพอใจ สำหรับภาระการบรรทุกที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์เปลี่ยนไปเนื่องจากมีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน อย่างไรก็ตาม ลักษณะเฉพาะของการสั่นเช่นค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เปลี่ยนไปมากนัก แบบจำลองที่ประเมินได้นี้มาจากการทดสอบที่มีการสั่นของตัวรถมากพอสมควร จึงเหมาะที่จะใช้ทำนายการสั่นที่เกิดขึ้นกับตัวรถในสภาพการขับขี่ที่เกิดการสั่นสูงเช่นการเคลื่อนที่ผ่านหลุมหรือเนิน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2544

##4170488321 : MAJOR MECHANICALL ENGINEERING
KEY WORD : CAR MODEL / CAR SUSPENSION / CAR VIBRATION / MODAL ANALYSIS
RITTHIKIT PRAPAIPICHIT : A STUDY OF CAR VIBRATION MODEL BY THE EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.WITHAYA YONGCHAROEN,Ph.D, 133 pp. ISBN 974-03-1390-6

This research is a study of car vibration model by experimental analysis method. Regarding of suspension system effect, the model's input is road condition while the model's outputs are main motions on the car body and wheels, considered 7 degree of freedoms. The crucial assumption is that the model is a linear rigid body model. By applying initial motion to the car body and wheels, free response datas are collected. The mathematical model is estimated by nonlinear least-squares regression using Guass-Newton iterative method, which is trying to adjust the parameters within mathematical model structure until the outputs from the model coincide with the measured ones. To compare the effect of load carrying , two conditions are tested , unloaded car and loaded car.

As a result, the estimated models can predict the response at a satisfied level. The result also reveals that the parameters of the loaded car vibration model differs from unloaded one due to change in operating condition, however, the vibration characteristic such as natural frequencies in various modes doesn't change much. Due to testing condition with high vibration at car body , the estimated model is suitable to predict response in driving condition with high vibration.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....
Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....
Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์รวมทั้งเอื้อเฟื้อรถที่ใช้ในการทดสอบและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในห้องปฏิบัติการ Measurement & Instrumentation

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ , ผศ.ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ครูและช่างเทคนิค รวมทั้งบุคลากรธุรการ ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำแนะนำด้านงานช่างและอำนวยความสะดวกในงานธุรการตลอดการทำงานวิจัย พร้อมกันนี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยสำหรับทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งช่วยแบ่งเบาค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัยไปได้อย่างมาก

ประโยชน์อันใดที่ได้จากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญุตาบูชาแด่ บิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่ง และครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญภาพ.....ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์..... ณ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....1
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....8
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 8
1.5 ขั้นตอนการทำการศึกษา.....8
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....9
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน
2.1 แบบจำลองกายภาพและแบบจำลองโมดัล.....10
2.2 แนวทางการหาแบบจำลองเชิงการทดลอง..... 14
2.3 แนวทางการหาพารามิเตอร์โมดัล.....16
2.4 แนวทางการหาพารามิเตอร์กายภาพ.....20
2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงทดลอง..... 24
2.6 สรุปวิธีและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์.....26
บทที่ 3 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ 7 ระดับขั้นเสรี
3.1 ข้อสมมติของแบบจำลอง..... 28
3.2 แบบจำลองกายภาพ.....29
3.3 แบบจำลองปริภูมิเสตทแบบต่อเนื่อง..... 41
3.4 แบบจำลองโมดัล.....42

หน้า

บทที่ 4 การทดลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของระบบแขวนและยางรถยนต์
4.1 การทดลองศึกษาคุณลักษณะความแข็งสปริงของระบบแขวน..... 44
4.2 การทดลองศึกษาคุณลักษณะความหน่วงของโช้คอัปซอร์บเบอร์..... 54
4.3 การทดลองศึกษาคุณลักษณะความแข็งของยางล้อรถ..... 57
บทที่ 5 การทดลองและการวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์
5.1 อุปกรณ์การทดลอง.....60
5.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 60
5.3 การวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 61
5.3.1 จัดเตรียมข้อมูลให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์..... 63
5.3.2 กำหนดโครงสร้างของแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 68
5.3.3 กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า..... 68
5.3.4 การคำนวณหาแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 70
5.3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....74
5.3.6 สรุปผลแบบจำลองที่ได้รับ..... 79
5.4 ผลของภาระบรรทุกที่มีต่อแบบจำลอง..... 83
บทที่ 6 สรุปผลวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ
6.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์..... 88
6.2 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 88
6.3 ข้อเสนอแนะ..... 88
รายการอ้างอิง..... 89
ภาคผนวก ก รายละเอียดบางประการเกี่ยวกับรถทดสอบ..... 91
ภาคผนวก ข ภาพอุปกรณ์การทดลอง..... 93
ภาคผนวก ค ตารางข้อมูลการทดลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของระบบแขวนและยางรถยนต์. 95
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ..... 99
ภาคผนวก จ การทำเคิร์ฟฟิตติ้งกับแบบจำลองประมาณ 3 ระดับขั้นเสรี..... 107
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการศึกษาการสั่นจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ประเมินได้.....119
ภาคผนวก ช ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล.....122
ภาคผนวก ซ ตัวอย่างการใช้แบบจำลองโมดัลหาผลตอบสนองการสั่น.....131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 133

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดการสั่นต่างๆ ของแบบจำลองวัตถุแข็งเกร็ง 7 ระดับขั้นเสรี โดยตัดผลของความหน่วง (งานวิจัยของ Larry J. Howell และ David C. Chang)..... 6

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้าง (K_{sf}) ณ แรงกด (F) ต่างๆกัน (ขณะรถไม่มีภาระบรรทุก)..... 52

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้าง (K_{sf}) ณ แรงกด (F) ต่างๆกัน (ขณะรถมีภาระบรรทุกที่ 180 kg)..... 52

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหลัง 1 ข้าง (K_{sr}) ณ แรงกด (F) ต่างๆกัน (ขณะรถไม่มีภาระบรรทุก)..... 53

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหลัง 1 ข้าง (K_{sr}) ณ แรงกด (F) ต่างๆกัน (ขณะรถมีภาระบรรทุก 180 kg)..... 53

ตารางที่ 4.5 ค่าความหน่วงเฉลี่ยของโช้คอัปซอร์บเบอร์ด้านหน้า ณ แรงถ่วงต่างๆกัน..... 57

ตารางที่ 4.6 ค่าความหน่วงเฉลี่ยของโช้คอัปซอร์บเบอร์ด้านหลัง ณ แรงถ่วงต่างๆกัน..... 57

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งสปริงเฉลี่ยของยางล้อรถ (k_t) ณ แรงกดต่างๆกัน..... 59

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งของแบบจำลองรถยนต์ขณะไม่มีภาระบรรทุก..... 74

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการนำแบบจำลองรถยนต์ที่ประเมินได้ ไปทำนายผลการสั่นกับข้อมูลการทดลองชุดอื่นที่ไม่ได้ใช้คำนวณหาแบบจำลอง..... 79

ตารางที่ 5.3 ค่าเจาะจงและค่าเวคเตอร์เจาะจงของแบบจำลองที่ประเมินได้..... 82

ตารางที่ 5.4 ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนการหน่วงสำหรับการสั่นในแต่ละโหมด..... 83

ตารางที่ 5.5 ตารางสรุปผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุก 180 kg (เปรียบเทียบกับแบบจำลองขณะรถยนต์ไม่มีภาระบรรทุก)..... 85

ตารางที่ 5.6 ตารางสรุปผลการนำแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุก 180 kg ที่ประเมินได้ ไปทำนายผลการสั่นกับข้อมูลการทดลองชุดอื่นที่ไม่ได้ใช้คำนวณหาแบบจำลอง (เปรียบเทียบกับแบบจำลองขณะรถยนต์ไม่มีภาระบรรทุก)..... 85

ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กายภาพของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุกเพิ่มขึ้น 180 kg กับขณะไม่มีภาระบรรทุก..... 86

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.8 ตารางเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนการหน่วงในแต่ละโหมดของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุกเพิ่มขึ้น 180 kg กับขณะไม่มีภาระบรรทุก..... 87

ตารางที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ตำแหน่งหน้ารถ (F) กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อรถด้านหน้า ($X_{bf} - X_{wf}$) ขณะที่รถไม่มีภาระบรรทุก..... 95

ตารางที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ตำแหน่งหน้ารถ (F) กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อรถด้านหน้า ($X_{bf} - X_{wf}$) ขณะที่รถมีภาระบรรทุก 180 kg 96

ตารางที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ตำแหน่งหลังรถ (F) กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อรถด้านหลัง ($X_{bf} - X_{wf}$) ขณะที่รถไม่มีภาระบรรทุก..... 96

ตารางที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ตำแหน่งหลังรถ (F) กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อรถด้านหลัง ($X_{bf} - X_{wf}$) ขณะที่รถมีภาระบรรทุกที่ 180 kg 97

ตารางที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถ่วงแกนโช้คอัปซอร์บเบอร์ของระบบแขวนด้านหน้ากับเวลาที่แกนโช้คอัปซอร์บเบอร์ใช้ในการเคลื่อนที่ (ในระยะทาง 11 cm) พร้อมคำนวณความเร็วเฉลี่ย.....97

ตารางที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถ่วงแกนโช้คอัปซอร์บเบอร์ของระบบแขวนด้านหลังกับเวลาที่แกนโช้คอัปซอร์บเบอร์ใช้ในการเคลื่อนที่ (ในระยะทาง 15 cm) พร้อมคำนวณความเร็วเฉลี่ย.....98

ตารางที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กดด้านบนของยางล้อกับระยะทางที่ยางถูกกดลงไปได้.....98

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบแกนควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ กำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์... 2
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของระบบแขวนด้านหน้าแบบอิสระ..... 3
รูปที่ 1.3 การเคลื่อนที่แบบต่างๆที่เกิดขึ้นได้กับระบบแขวนด้านหลังแบบคานแข็ง..... 3
รูปที่ 1.4 แบบจำลองวัตถุแข็งเกร็ง ตามข้อสมมติของ Larry J. Howell และDavid C. Chang... 4
รูปที่ 1.5 อัตราเร่งที่เกิดขึ้นบริเวณที่นั่งผู้โดยสารในโดเมนของความถี่ จากการนำจำลองสถานการณ์รถวิ่งบนพื้นถนน ด้วยอัตราเร็วคงที่ (งานวิจัยของ Larry J. Howell และ David C. Chang).....7
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบการสั่น 3 ระดับขั้นเสรี.....10
รูปที่ 2.2 แผนภาพการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยทฤษฎีทางตรง.....14
รูปที่ 2.3 แผนภาพการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงการทดลอง.....15
รูปที่ 2.4 กราฟขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน $\left|H_{54}(\omega)\right|$ ด้วยการสมมติค่าพารามิเตอร์กายภาพแล้วคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนทางทฤษฎี.....18
รูปที่ 2.5 แผนภาพการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอน $H(\omega)$ ด้วยวิธีการทดลอง.....19
รูปที่ 2.6 ภาพรวมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 24
รูปที่ 3.1 แบบจำลองวัตถุแข็งเกร็งของระบบแขวนรถยนต์ แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ..... 30
รูปที่ 3.2 การพรรณนาการเคลื่อนที่ของแบบจำลองระบบแขวนรถยนต์ ที่คำนึงการเคลื่อนที่ 7 ระดับขั้นเสรี ด้วยโคออร์ดิเนตหลัก 7 ตัว.....33
รูปที่ 3.3 การพรรณนาการเคลื่อนที่ของแบบจำลองระบบแขวนรถยนต์ ที่คำนึงการเคลื่อนที่ 7 ระดับขั้นเสรี ด้วยโคออร์ดิเนตช่วยในการพิสูจน์สมการการเคลื่อนที่.....34
รูปที่ 3.4 ผังวัตถุอิสระของล้อหน้าซ้ายและขวาตามลำดับ.....35
รูปที่ 3.5 ผังวัตถุอิสระของชุดเพลาล้อหลัง..... 35
รูปที่ 3.6 ผังวัตถุอิสระของมวลถูกแขวน..... 36
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงอินพุทและเอาท์พุทของแบบจำลองระบบแขวนรถยนต์ที่คำนึงการเคลื่อนที่ 7 ระดับขั้นเสรี..... 41
รูปที่ 4.1 แผนภาพการสั่นเนื่องจากระบบแขวนของรถยนต์เมื่อมองด้านข้าง 2 มิติโดยพิจารณาการเคลื่อนที่ 4 ระดับขั้นเสรี และตัดผลของตัวหน่วง..... 44
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่น ณ จุดศูนย์กลางของล้อรถ..... 46

หน้า

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่น ณ ตัวรถ (มวลถูกแขวน) ซึ่งเป็นตำแหน่งเหนือจุดศูนย์กลางของล้อรถ..... 46
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด F เนื่องจากมวลถ่วงที่วางด้านหน้ารถ กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อรถด้านหน้า $X_{bf} - X_{wf}$ (ขณะไม่มีภาระบรรทุก).... 48
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด F เนื่องจากมวลถ่วงที่วางด้านหน้ารถ กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อด้านหน้า $X_{bf} - X_{wf}$ (ขณะมีภาระบรรทุก180 kg).. 48
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด F เนื่องจากมวลถ่วงที่วางด้านหลังรถ กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อด้านหลัง $X_{br} - X_{wr}$ (ขณะไม่มีภาระบรรทุก)..... 49
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด F เนื่องจากมวลถ่วงที่วางด้านหลังรถ กับระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัวรถกับล้อด้านหลัง $X_{br} - X_{wr}$(ขณะมีภาระบรรทุก 180 kg).. 50
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงการหาความชันเฉลี่ยที่ใช้ในการหาค่าความแข็งสปริงเฉลี่ยของระบบแขวนโดยยกตัวอย่างกราฟการทดลองรูปที่ 4.6..... 51
รูปที่ 4.9 แผนภาพอุปกรณ์ในการทดสอบความหน่วงของโช้คอัปซอร์ปเบอร์..... 54
รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างแรงถ่วง (F) กับความเร็วเฉลี่ย (v) ที่แกนของโช้คอัปซอร์ปเบอร์ระบบแขวนด้านหน้าใช้ในการเคลื่อนที่ระยะทาง 11cm (จากการทดลองที่ถ่วงมวลต่างๆกัน).... 55
รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างแรงถ่วง (F) กับความเร็วเฉลี่ย (v) ที่แกนของโช้คอัปซอร์ปเบอร์ระบบแขวนด้านหลังใช้ในการเคลื่อนที่ระยะทาง 15cm (จากการทดลองที่ถ่วงมวลต่างๆกัน).... 56
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กดด้านบนของยางล้อรถ (F) กับระยะทางที่ยางถูกกดลงไปได้ (x)..... 58
รูปที่ 5.1 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์การทดลอง..... 60
รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งที่ทดลองกด โดยมีผู้ทดลอง 2 คน กดพร้อมกัน..... 61
รูปที่ 5.3 แผนภาพการวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์จากข้อมูลการสั่นที่ได้จากการทดลอง..... 62
รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองของล้อหน้าขวา, ล้อหน้าซ้าย ,ล้อหลังขวา และล้อหลังซ้าย (X_1 , X_2 , X_3 , X_4 ตามลำดับ) 63
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของตัวรถด้านหน้าขวา, หน้าซ้าย ,หลังขวา และหลังซ้าย (X_5 , X_6 , X_7 , X_8 ตามลำดับ) 64
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนตที่วัดได้ (X_3 , X_4) กับโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์ (X_a , θ_a) ของชุดเพลาล้อหลัง..... 64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนตที่วัดได้ (X_5 , X_6 , X_7 , X_8) กับโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์ (X_G , θ_p , θ_r) ของมวลถูกแขวน..... 65

รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของชุดเพลาล้อหลัง X_a, θ_a 66

รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของมวลถูกแขวน (ตัวรถ) X_G , θ_p , θ_r 67

รูปที่ 5.10 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าขวา (X_1) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง 70

รูปที่ 5.11 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าซ้าย (X_2) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 71

รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ ณ จุดศูนย์ถ่วงของชุดเพลาล้อหลัง (X_a) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 71

รูปที่ 5.13 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนของชุดเพลาล้อหลัง (θ_a) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 72

รูปที่ 5.14 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ ณ จุดศูนย์ถ่วงของมวลถูกแขวน (X_G) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 72

รูปที่ 5.15 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบกระดอน (θ_p) ของมวลถูกแขวนที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 73

รูปที่ 5.16 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบโคลงตัว (θ_r) ของมวลถูกแขวน ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง..... 73

รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าขวา (X_1) ที่แบบจำลองทำนายได้กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 75

รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าซ้าย (X_2) ที่แบบจำลองทำนายได้กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 75

รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหลังขวา (X_3) ที่แบบจำลองทำนายได้กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 76

รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหลังซ้าย (X_4) ที่แบบจำลองทำนายได้กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 76

รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหน้าขวา (X_5) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 77

หน้า

รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหน้าซ้าย (X_6) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 77
รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหลังขวา (X_7) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 78
รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหลังซ้าย (X_8) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง..... 78

รูปที่ ก.1 รถที่ใช้ในการทดสอบ..... 91
รูปที่ ก.2 เพลาล้อหลังและชุดเฟืองท้าย..... 91
รูปที่ ก.3 ระบบรองรับน้ำหนักด้านหน้า..... 92
รูปที่ ก.4 ระบบรองรับน้ำหนักด้านหลัง..... 92
รูปที่ ข.1 การ์ดแปลงสัญญาณ PC –LabCard รุ่น PCL-812PG ของบริษัท Advantech Co. Ltd..... 93
รูปที่ ข.2 อุปกรณ์วัด LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ที่ใช้วัดสัญญาณการเคลื่อนที่..... 93
รูปที่ ข.3 แหล่งจ่ายไฟตรง (Regulate DC Power Supply) ของบริษัท Crotech..... 94
รูปที่ ข.4 เครื่องกดไดเนอร์มิกเซอร์โว (Dynamic servo) ที่ใช้ในการกดทดสอบความแข็งยางล้อ..... 94
รูปที่ ง.1 ภาพแสดงการหาตำแหน่งจุด c.g. ของตัวรถ..... 103
รูปที่ ง.2 ภาพแสดงการหาตำแหน่งจุด c.g. ของตัวรถขณะมีภาระบรรทุก 180 kg..... 104
รูปที่ ง.3 ชุดเพลาล้อหลังแสดงมิติต่างๆ..... 105
รูปที่ จ.1 แบบจำลองระบบแขวน 3 ระดับขั้นเสรี (สมมติการเคลื่อนที่ของล้อมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของตัวรถ)..... 108
รูปที่ จ.2 ผังวัตถุอิสระของแบบจำลองการสั่นรถ 3 ระดับขั้นเสรี พร้อมแสดงโคออร์ดิเนตและพารามิเตอร์ต่างๆ..... 111
รูปที่ จ.3 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ ณ จุดศูนย์ถ่วงมวลถูกแขวน (X_G) ที่ประเมินได้จากแบบจำลอง 3 ระดับขั้นเสรี กับการทดลองจริง..... 117
รูปที่ จ.4 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบกระดอน (θ_p) ของมวลถูกแขวนที่ประเมินได้จากแบบจำลอง 3 ระดับขั้นเสรีกับการทดลองจริง..... 117

หน้า

รูปที่ จ.5 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบโคลงตัว (θ_r) ของมวลถูกแขวนที่ประเมินได้จากแบบจำลอง 3 ระดับขั้นเสรี กับการทดลองจริง.....118
รูปที่ ฉ.1 เนินสมมติในการศึกษาการสั่น..... 119
รูปที่ ฉ.2 การสั่น ณ ตำแหน่งต่างๆของรถเมื่อล้อหน้าขวาวิ่งผ่านเนินสูง 6 cm ในระยะ 10 cm แรก และสูงคงที่ในระยะ 20 cm ถัดมา และกลับสู่ศูนย์ในระยะ 10 cm สุดท้าย (รถวิ่งด้วยความเร็ว 7.2 km/hr).....120
รูปที่ ซ.1 กราฟผลตอบสนองการสั่นที่ล้อหน้าขวาโดยหาจากแบบจำลองโมดัลเมื่อมีอินพุทกระทำคือการเคลื่อนที่ของพื้นถนนที่ล้อหน้าขวาที่เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย..... 132

คำอธิบายสัญลักษณ์

$diag(a_1, a_2, ..., a_n)$ คือ เมทริกซ์ทแยงมิติ nxn โดยมีสมาชิกแนวทแยงคือ $a_1, a_2, ..., a_n$

$\overline{SD}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ถูกนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าสูงสุดของข้อมูล

$[A]^T$ คือ ทรานสโพสของเมทริกซ์ A

$[A]^{-1}$ คือ อินเวอร์สของเมทริกซ์ A

$L^{-1}\{Y(S)\}$ คือ ผลการแปลงกลับลาปลาซของฟังก์ชัน Y(S)

[M] คือ เมเทริกซ์มวล

[C] คือ เมทริกซ์ความหน่วง

[K] คือ เมทริกซ์ความแข็งสปริง

{f} คือ เวกเตอร์แรง

{x} คือ เวกเตอร์การกระจัดในโคออร์ดิเนตกายภาพ

$\{\eta\}$ คือ เวกเตอร์ในโคออร์ดิเนตมุขสำคัญ

λ_r คือ ค่าเจาะจงของโหมดที่ r

ξ_r คือ อัตราส่วนการหน่วงของโหมดที่ r

ω_r คือ ความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ r

ω คือ ความถี่ของแรงที่กระทำกับระบบ

$[\Phi]$ คือ โหมดเชพเมทริกซ์ที่ถูกนอร์มัลไลซ์ด้วยมวล

$H(\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน ที่ได้จากทฤษฎี

$G(\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการทดลอง

$\{x\}$ คือ ตัวแปรเสตท

{u} คือ สัญญาณอินพุท

{y} คือ สัญญาณเอาท์พุท

A คือ เมทริกซ์ระบบ

B คือ เมทริกซ์สัญญาณอินพุท

C คือ เมทริกซ์สัญญาณเอาท์พุท

D คือ เมทริกซ์สัญญาณป้อนไปข้างหน้า

$X(S)$ คือ ผลการแปลงลาปลาซของสัญญาณ x(t)

$\{x(0)\}$ คือ เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรเสถา $\{x\}$

M_b คือ มวลของมวลถูกแขวน

M_a คือ มวลของชุดเพลาล้อหลัง

M_w คือ มวลของล้อหน้า

I_p คือ ความเฉื่อยเชิงมวลรอบแกน y ณ จุด c.g. ของมวลถูกแขวน

I_r คือ ความเฉื่อยเชิงมวลรอบแกน x ณ จุด c.g. ของมวลถูกแขวน

I_a คือ ความเฉื่อยเชิงมวลรอบแกน y ณ จุด c.g. ของชุดเพลาล้อหลัง

L คือ ระยะห่างตามแกน X ระหว่างจุด c.g. ของล้อหน้ากับล้อหลัง (m)

L_f คือ ระยะห่างตามแกน X จากจุด c.g. ของล้อหน้า ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m)

L_r คือ ระยะห่างตามแกน X จากจุด c.g. ของล้อหลัง ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m)

L_t คือ ระยะห่างตามแกน Y ระหว่างจุด c.g. ของล้อหลังซ้ายกับล้อหลังขวา (m)

L_{tl} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุด c.g. ของล้อหลังซ้าย ถึงจุด c.g. ของชุดเพลาล้อหลัง (m)

L_{tr} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุด c.g. ของล้อหลังขวา ถึงจุด c.g. ของชุดเพลาล้อหลัง (m)

L_c คือ ระยะห่างตามแกน Y ระหว่างจุดรองรับ ด้านหน้าทางซ้ายกับทางขวา (m)

L_{cl} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุดรองรับด้านหน้าทางซ้าย ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m)

L_{cr} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุดรองรับด้านหน้าทางขวา ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m)

L_s คือ ระยะห่างตามแกน Y ระหว่างจุดรองรับด้านหลังทางซ้ายกับทางขวา (m)

L_{sl} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุดรองรับด้านหลังทางซ้าย ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m)

L_{sr} คือ ระยะห่างตามแกน Y จากจุดรองรับด้านหลังทางขวา ถึงจุด c.g. ของมวลถูกแขวน (m

K_{sf} คือ ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้าง

K_{sr} คือ ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหลัง 1 ข้าง

K_t คือ ค่าความแข็งของยางล้อ

C_{sf} คือ ค่าความหน่วงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้าง

C_{sr} คือ ค่าความหน่วงของระบบแขวนด้านหลัง 1 ข้าง

C_t คือ ค่าความหน่วงของยางล้อ

Y_1 คือ การเคลื่อนที่ของพื้นถนน ที่กระทำกับล้อหน้าขวา

Y_2 คือ การเคลื่อนที่ของพื้นถนน ที่กระทำกับล้อหน้าซ้าย

Y_3 คือ การเคลื่อนที่ของพื้นถนน ที่กระทำกับล้อหลังขวา

Y_4 คือ การเคลื่อนที่ของพื้นถนน ที่กระทำกับล้อหลังซ้าย

X_1 , X_2 คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงที่จุด c.g. ของล้อหน้าขวา, ล้อหน้าซ้าย ตามลำดับ

X_3 , X_4 คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงที่จุด c.g. ของล้อหลังขวา และซ้าย ตามลำดับ

X_5 , X_6 คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงของมวลถูกแขวน ณ จุดรองรับของระบบแขวนด้านหน้าขวา และซ้าย ตามลำดับ

X_7 , X_8 คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงของมวลถูกแขวน ณ จุดรองรับของระบบแขวนด้านหลังขวา และซ้าย ตามลำดับ

X_{3S} , X_{4S} คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงของชุดเพลาล้อหลัง ณ จุดรองรับของระบบแขวนด้านหลังขวา และซ้าย ตามลำดับ

X_a , θ_a คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงที่จุด c.g. และการหมุนรอบแกน X ของชุดเพลาล้อหลังตามลำดับ

X_G θ_p,θ_r คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงที่จุด c.g. , การหมุนรอบแกน Y และการหมุนรอบแกน X ของมวลถูกแขวน ตามลำดับ

M_t คือ มวลของรถทั้งคัน โดยรวมมวลถูกแขวนและมวลไม่ถูกแขวนทั้งหมดณสมบัติเชิงมิติ

L_{ft} คือ แกน X จากจุด c.g. ของล้อหน้า ไปยังจุด c.g. รวม (m)

L_{rt} คือ ระยะตามแกน X จากจุด c.g. ของล้อหลัง ไปยังจุด c.g. รวม

I_{pt} คือ ความเฉื่อยเชิงมวลของรถทั้งคัน รอบแกน y ณ จุด c.g. รวม

I_{rt} คือ ความเฉื่อยเชิงมวลของรถทั้งคัน รอบแกน x ณ จุด c.g. รวม

K_f คือ ค่าความแข็งสปริงรวม ระหว่างค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้าง อนุกรมกับค่าความแข็งสปริงของยางล้อ

K_r ค่าความแข็งสปริงรวม ระหว่างค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหลัง 1 ข้าง อนุกรมกับค่าความแข็งสปริงของยางล้อ

C_f คือ ค่าความหน่วงรวมระหว่างค่าความหน่วงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้างกับความหน่วงของยางล้อ

C_r คือ ค่าความหน่วงรวมระหว่างค่าความหน่วงของระบบแขวนด้านหน้า 1 ข้างกับความหน่วงของยางล้อ