การศึกษาผลจากการโคลงของรถต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่

นางสาวพิชญา มนัสวีพงศ์สกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

INVESTIGATION OF DRIVER STEERING CHARACTERISTICS INFLUENCE BY ROLL MOTION

Miss Pichaya Manasveepongsakul

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลจากการโคลงของรถต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่
โดย	นางสาวพิชญา มนัสวีพงศ์สกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.นักสิทธ์ นุ่มวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.นักสิทธ์ นุ่มวงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เจตวีย์ ภัครัชพันธุ์)

พิชญา มนัสวีพงศ์สกุล : การศึกษาผลจากการโคลงของรถต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่. (INVESTIGATION OF DRIVER STEERING CHARACTERISTICS INFLUENCE BY ROLL MOTION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.นักสิทธ์ นุ่มวงษ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์, 156 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลจากการโคลงของรถยนต์ที่มีต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ โดยอาศัยระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ในการจำลองสถานการณ์ที่กำหนดไว้ รวมทั้งติดตั้งอุปกรณ์สำหรับ วัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการขณะทำการทดลองด้วย การนำระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์มาใช้จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เช่น โครงสร้างที่นั่งซึ่งเดิมมีน้ำหนักมาก จึงต้องออกแบบ โครงสร้างใหม่และเลือกแบบที่ดีเหมาะสมที่สุดโดยโครงสร้างที่นั่งใหม่ที่ได้มีน้ำหนักเบากว่าเดิมถึง 35 กิโลกรัม จากนั้นจึงมีการออกแบบตำแหน่งข้อต่อและความยาวของแขนกล เพื่อที่จะให้ระบบจำลองนี้สามารถทำงานได้ในช่วงที่กำหนดไว้ ในการทดลองใช้ผู้ทดสอบจำนวนทั้งหมด 33 คน ประกอบด้วย ผู้หญิง 15 คนและผู้ชาย 18 คน โดยจำลองการโคลงแบบขั้นขนาดหนึ่งหน่วยเริ่มต้นที่ 10 องศา และให้ผู้ขับขี่จับพวงมาลัย 2 แบบ คือจับด้วยมือเดียวและสองมือ จากนั้นจึงเก็บข้อมูลมุมการโคลงและมุมการห มุนพวงมาลัยที่เวลาต่างๆ เพื่อนำไปใช้หาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคนซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบต่อไป จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า ผลการตอบสนองเชิงความถี่เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือทั้งสองข้างสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 โดยมีผู้ทดสอบจำนวน 20 คนที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้จำลองได้ดีมาก และส่วนที่เหลือสามารถจำลองได้ใกล้เคียงเท่านั้น ส่วนผลการตอบสนองเชิงความถี่เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือข้างเดียวสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 โดยมีผู้ทดสอบจำนวน 21 คนที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้จำลองได้ดีมาก 11 คนสามารถจำลองได้ใกล้เคียงและ 1 คนที่ไม่สามารถจำลองด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้ นอกจากนี้ยังมีการทำการทดลองเพิ่มเติมโดยจำลองการโคลงของรถสามล้อเพื่อศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวเช่นกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

##5470303421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DRIVER BEHAVIOR / ROLL MOTION / DRIVING SIMULATOR / SYSTEM MODELLING

PICHAYA MANASVEEPONGSAKUL : INVESTIGATION OF DRIVER STEERING CHARACTERISTICS INFLUENCED BY ROLL MOTION. ADVISOR : NUKSIT NOOMWONGS, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST. PROF. SUNHAPOS CHANTRANUWATHANA, Ph.D., 156 pp.

The objective of this thesis is to investigate the steering behavior of drivers by using the driving simulator, which provides a convenient framework for detecting various driver response parameters under controlled situation. However, in order to use this driving simulator, some components, such as cockpit are needed to be redesigned and adjusted for more flexibility. Firstly, the old design of cockpit is very heavy, so we have to make a design requirement and a new conceptual design to consider a suitable one. Then, we have developed the new cockpit frame which decreasing from 65 kg to 30 kg. Next, we have design a new joint position to be able to have a workspace requirement. In the experiment, we have done the data collecting experiment with 33 test drivers, consisting of 15 female and 18 male. Under the experiment conditions, a 10-degree roll angle is applied to the driving simulator as a unit step function and the experiment is conducted with two mode of testing, i.e., by holding the steering wheel in one hand and two hands. The steering wheel angle and vehicle roll angle, which is originally represented in time domain, are measured to be converted to frequency domain for further study. The result shows that, for a two-hand holding experiment setup, all of the driver frequency responses (33 test subjects), can be represented as a third order transfer functions and 20 cases of that may be considered as mostly fit, while the other as approximately fit. In the case of one-hand holding experiment setup, one case cannot be represented as the third order transfer function, while the numbers of mostly fit and approximate fit case are 21 and 11, respectively. Moreover, we have also done the experiment with three-wheel vehicle (Tuk-Tuk) to study the driver's behavior.

Department Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year 2011 Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร .นักสิทธ์ นุ่มวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ. ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเป็นอย่างสูงที่ช่วยสละเวลามาคอยให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางของการทำงานวิจัยนี้ ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาในระหว่างการทำงานวิจัย รวมทั้งคอยติดตามการทำงานวิจัยอย่างสม่ำเสมอ จนงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณคณาจารย์และผู้สอนงานปฏิบัติการของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้ผู้วิจัยจนสามารถทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ได้ นอกจากความรู้ในสายวิชาชีพแล้วอาจารย์ยังถ่ายทอดแนวคิดและข้อคิดที่ดีซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานได้อีกด้วย ขอขอบคุณนายจารุบุตร คณะนัย นายตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล และเพื่อนนิสิตทุกท่านที่ช่วยให้คำปรึกษาและมีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้จนทำให้งานวิจัยประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ ช่วยให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้และให้ทุนเพื่อไปนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ ขอขอบคุณสมาคมยานยนต์แห่งประเทศไทยอย่างยิ่งที่ให้การสนับสนุนด้านทุนสำหรับการไปนำเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติที่ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นโอกาสที่ดีที่ได้มีโอกาส เรียนรู้งานวิจัยต่างๆ ในระดับนานาชาติ

ขอบคุณนายภัทรดนัย สถาปัตยานนท์ , นายภาพ สกุลดิษฐ์ , นายภานิษฐ์ ตีร สวัสดิชัย และนายกรวุฒิ พรบุญยรัตน์ ที่มีส่วนช่วยในการทำการทดลอง เก็บข้อมูล ตลอดจนช่วยทำการประมวลผลข้อมูลจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องนิสิตทุกคน ที่มาเป็นผู้ทดสอบและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีกับการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนันสนุนตลอดมา ทั้งในเรื่องการเรียน การพัฒนาศักยภาพด้านต่างๆ รวมถึง ทุนทรัพย์สำหรับการศึกษาและการทำงานวิจัยเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฏ

สารบัญรูปภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 5

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 6

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม 7

2.1 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) 7

2.1.1 หลักการจำลองการเคลื่อนที่ 7

2.1.2 กลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่รูปแบบต่างๆ 10

2.1.2.1 กลไกแบบ 6 องศาอิสระแบบไฮดรอลิก 10

2.1.2.2 กลไกแบบ 3-UPU 11

2.1.2.3 กลไกแบบ CMS 11

2.1.2.4 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ 12

2.2 การรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ 13

หน้า

2.2.1 ระบบประสาท 13
2.2.1.1 ระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System) 14
2.2.1.2 ระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral Nervous System) 14
2.2.1.3 ระบบประสาทอัตโนมัติ (Autonomic Nervous System) 15
2.2.2 ระบบการทรงตัว 15
2.2.2.1 ระบบการมองเห็น (Vision System) 15
2.2.2.2 ระบบการรับความรู้สึกของกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception System) 16
2.2.2.3 ระบบการรับรู้ความเร่ง (Vestibular System) 16
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่ 18

บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 21
3.1 การกำหนดขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 21
3.1.1 การกำหนดขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 21
3.1.1.1 พิจารณาการทดสอบขับรถยนต์ในสภาวะทั่วไปบนถนน 22
3.1.1.2 พิจารณาจากระบบจำลองการขับขี่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน 23
3.1.2 การกำหนดจุดหมุนของกลไกในระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 25
3.1.3 การกำหนดลักษณะกลไกสำหรับระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 27
3.1.4 การกำหนดลักษณะโครงสร้างของโครงสร้างที่นั่ง 27
3.2 รูปแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 27
3.2.1 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1 28
3.2.2 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2 29
3.2.3 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3 30
3.3 การวิเคราะห์และเลือกระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสม 32

หน้า

3.3.1 เกณฑ์การพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่างๆ 32
3.3.1.1 พิจารณาช่วงของมุมพิทช์และมุมโรล 32
3.3.1.2 พิจารณาน้ำหนักโครงสร้างที่นั่ง 32
3.3.1.3 พิจารณาการจัดสรรงบประมาณ 32
3.3.1.4 พิจารณาความสะดวกในการใช้งาน 33
3.3.1.5 พิจารณาการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ที่มีอยู่ 33
3.3.2 วิธีการวิเคราะห์และตัดสินใจ 33
3.3.3 สรุปผลแบบจำลองที่เหมาะสม 34
3.4 การคำนวณและวิเคราะห์โครงสร้างกลไกของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 34
3.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 35
3.4.1.1 การคำนวณจำนวนองศาอิสระของระบบจำลอง
การขับขี่ยานยนต์ 36
3.4.1.2 การคำนวณตำแหน่งต่างๆ ของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ .. 37
3.4.1.2.1 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (Center of Gravity, CG)
ของโครงสร้างที่นั่ง 37
3.4.1.2.2 ตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างของระบบจำลอง
การขับขี่ยานยนต์ 37
3.4.1.3 การคำนวณแรงกระทำบนกลไกต่างๆ ของระบบจำลอง
การขับขี่ยานยนต์ 42
3.4.2 แบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว (Simulation Model) 45
3.5 ผลการทดลองกับโครงสร้างจริง 47

บทที่ 4 ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบพลวัติ 49
4.1 ฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) 49
4.1.1 การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) 50

หน้า

4.1.2 การแปลงฟูรีเย (Fourier Transform) 52
4.2 การตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) 54
4.3 การหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ 55

บทที่ 5 การทดลอง 59
5.1 สภาวะในการทดสอบ 59
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ 62
5.3 การจัดเตรียมการทดลอง 64
5.4 ขั้นตอนการทดลอง 66
5.5 ผลการทดลอง 71
5.6 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล 73

บทที่ 6 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง 82
6.1 อภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถยนต์ 82
6.2 อภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถสามล้อ 90
6.3 สรุปผลการทดลอง 97

บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 98
7.1 สรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 98
7.2 สรุปผลการศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ขณะรถยนต์เกิดการโคลง .. 98
7.3 ข้อเสนอแนะ 99

รายการอ้างอิง 100

ภาคผนวก 104

หน้า

ภาคผนวก ก การคำนวณแรงที่กระทำบนโครงสร้างของระบบจำลอง
การขับขี่ยานยนต์ 105
ภาคผนวก ข วิเคราะห์การเคลื่อนไหวกลไกด้วยโปรแกรม MATLAB SimMechanic . 116
ภาคผนวก ค รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง 120
ภาคผนวก ง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและประมวลผลการทดลองของ
ผู้ทดสอบแต่ละคน 133
ภาคผนวก จ รายละเอียดการใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลข้อมูล 143

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 155

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาในการดำเนินงานในปีการศึกษา 2554..... 5
ตารางที่ 2 ตารางแสดงมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีในปัจจุบัน. 24
ตารางที่ 3 การให้คะแนนแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อพิจารณาความเหมาะสมด้านต่างๆ..... 34
ตารางที่ 4 จำนวนทิศทางการเคลื่อนที่ที่ถูกจำกัดของข้อต่อชนิดต่างๆ 36
ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 85
ตารางที่ 6 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง..... 88
ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยห่างจาก
จุดหมุน 15 เซนติเมตร 92
ตารางที่ 8 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยห่างจาก
จุดหมุน 30 เซนติเมตร 95
ตารางที่ ค1 คุณสมบัติของโพเทนชิโอมิเตอร์ 120
ตารางที่ ค2 แสดงคุณสมบัติของเอนโคดเดอร์ HOHNER Series 21..... 122
ตารางที่ ค3 คุณสมบัติของ NI CompactRIO รุ่น NI cRIO9074..... 123
ตารางที่ ค4 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9411 125
ตารางที่ ค5 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9025 128
ตารางที่ ค6 คุณสมบติของ Accelus 131
ตารางที่ ง1 รายชื่อของผู้ทดสอบทั้งหมด 33 คน 133
ตารางที่ ง2 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 135
ตารางที่ ง3 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง..... 136
ตารางที่ ง4 รายชื่อของผู้ทดสอบจำลองการโคลงของรถสามล้อทั้งหมด 30 คน..... 138
ตารางที่ ง5 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร ... 139
ตารางที่ ง6 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร ... 140

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงแกนอ้างอิง มุมพิทช์ มุมโรล และมุมยอร์วของรถยนต์ 8
ภาพที่ 2 การเอียงกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า
และหลังของผู้ขับขี่ 9
ภาพที่ 3 กลไกแบบสจ๊วจ 10
ภาพที่ 4 กลไกแบบ 3-UPU 11
ภาพที่ 5 กลไกแบบ CMS 12
ภาพที่ 6 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ 13
ภาพที่ 7 สมอง (Brain) และไขสันหลัง (Spinal Cord) 14
ภาพที่ 8 เส้นประสาทสมอง (Cranial Nerve) และเส้นประสาทไขสันหลัง (Spinal Nerve) ... 15
ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของระบบการมองเห็น 16
ภาพที่ 10 ระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์ (Vestibular System) 17
ภาพที่ 11 ตัวอย่างระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีในปัจจุบัน 24
ภาพที่ 12 แสดงแรงต้านทางการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดตำแหน่งจุดหมุนที่แตกต่างกัน 26
ภาพที่ 13 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงที่จำลองได้กับแรงที่ต้องการเมื่อกำหนดตำแหน่ง
จุดหมุนที่แตกต่างกัน 26
ภาพที่ 14 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1 28
ภาพที่ 15 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2 29
ภาพที่ 16 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3 31
ภาพที่ 17 จุดเชื่อมต่อและแขนต่างๆ บนระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 35
ภาพที่ 18 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างที่นั่งขณะไม่มีการเคลื่อนที่ในมุมพิทช์
และมุมโรล 37
ภาพที่ 19 พิกัดของตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างที่นั่ง 38
ภาพที่ 20 ตำแหน่งข้อต่อบนแขนหมายเลข 3 39

หน้า

ภาพที่ 21 Free Body Diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างขณะอยู่ในภาวะสมดุล..... 43
ภาพที่ 22 แผนภาพ SimMechanics ซึ่งใช้จำลองการเคลื่อนไหว 46
ภาพที่ 23 โครงสร้างจริงที่ใช้ในการทดสอบ 47
ภาพที่ 24 กราฟแสดงช่วงการใช้งานมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ . 48
ภาพที่ 25 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแสดงฟังก์ชั่นถ่ายโอน 50
ภาพที่ 26 แสดงการแปลงฟังก์ชั่นบนโดเมนของเวลาให้อยู่บนโดเมนความถี่โดยใช้
การแปลงลาลาซ 51
ภาพที่ 27 Feedback Loop ของระบบ G(s) 56
ภาพที่ 28 ลักษณะการจับพวงมาลัยรถยนต์ของผู้ทดสอบ 60
ภาพที่ 29 ลักษณะการจับพวงมาลัยรถสามล้อของผู้ทดสอบ 61
ภาพที่ 30 โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้น 62
ภาพที่ 31 เอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งการหมุน 63
ภาพที่ 32 อุปกรณ์ประมวลผล NI CompactRIO 63
ภาพที่ 33 Accelus 64
ภาพที่ 34 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 65
ภาพที่ 35 การเชื่อมต่อสายสัญญาณของอุปกรณ์ต่างๆ 65
ภาพที่ 36 หน้าจอสำหรับอ่านค่าของโปรแกรม LabVIEWS® 67
ภาพที่ 37 การตั้งค่าช่อง Period เป็น 1000 μs 68
ภาพที่ 38 ปุ่ม Run โปรแกรม 68
ภาพที่ 39 ตำแหน่งการจับพวงมาลัยเริ่มต้นกำหนดให้เป็นศูนย์องศา 68
ภาพที่ 40 ยกโครงสร้างให้เอียงที่มุมการโคลง 10 องศาซึ่งเป็นมุมเริ่มต้น 69
ภาพที่ 41 ปุ่มบนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมขณะมีการเก็บข้อมูล 69
ภาพที่ 42 ปุ่มบนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมขณะหยุดเก็บข้อมูล 70
ภาพที่ 43 กดปุ่มหยุด Run โปรแกรม 70

หน้า

ภาพที่ 44 ข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองซึ่งอยู่ในรูปแบบไฟล์ .txt 70
ภาพที่ 45 ไฟล์ .txt ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 71
ภาพที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับเวลาของผู้ทดสอบคนที่ 1 . 72
ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวของพวงมาลัยกับเวลา
ของผู้ทดสอบคนที่1..... 72
ภาพที่ 48 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่จากการแปลงฟูรีเยแบบเร็ว..... 73
ภาพที่ 49 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่จากวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม 74
ภาพที่ 50 ข้อมูลในโดเมนของเวลาในโปรแกรม Microsoft Excel 75
ภาพที่ 51 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบคนที่ 1..... 76
ภาพที่ 52 กราฟแสดงขนาดที่ความถี่ต่างๆ ของผลการตอบสนองเชิงความถี่ 77
ภาพที่ 53 กราฟแสดงเฟสที่ความถี่ต่างๆ ของผลการตอบสนองเชิงความถี่ 77
ภาพที่ 54 กราฟค่าเฉลี่ยขนาดของผลการตอบสนองเชิงความถี่ 78
ภาพที่ 55 กราฟค่าเฉลี่ยเฟสของผลการตอบสนองเชิงความถี่..... 78
ภาพที่ 56 ผลการตอบสนองเชิงความถี่จากการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอน 81
ภาพที่ 57 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลอง
เมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 83
ภาพที่ 58 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 84
ภาพที่ 59 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 84
ภาพที่ 60 ลักษณะกราฟที่ข้อมูลผลการตอบสนองเชิงความถี่ไม่สามารถใช้ได้
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว 85
ภาพที่ 61 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลอง
เมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง 86

หน้า

ภาพที่ 62 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง 87
ภาพที่ 63 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง 87
ภาพที่ 64 กราฟการประมาณซึ่งใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ที่ปรับเปลี่ยนใหม่ 89
ภาพที่ 65 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลอง
เมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร..... 90
ภาพที่ 66 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร..... 91
ภาพที่ 67 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร..... 92
ภาพที่ 68 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลอง
เมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร..... 93
ภาพที่ 69 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร..... 94
ภาพที่ 70 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร..... 94
ภาพที่ 71 กราฟการประมาณซึ่งใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 กับซีโร่อันดับ 2..... 96
ภาพที่ ก1 Free Body Diagram ซึ่งแสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างขณะอยู่ในภาวะสมดุล... 105
ภาพที่ ก2 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่ง 106
ภาพที่ ก3 แรงจากแขนหมายเลข 2 มีลักษณะเป็น Two-Force Member..... 107
ภาพที่ ก4 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ Y-Z 107
ภาพที่ ก5 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Z 108
ภาพที่ ก6 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Y 109
ภาพที่ ก7 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3..... 112

หน้า

ภาพที่ ก8 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3 ในระนาบ X-Z 112
ภาพที่ ก9 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3 ในระนาบ Y-Z 114
ภาพที่ ข1 ระบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว 117
ภาพที่ ข2 โครงสร้างที่นั่ง (Driving Module, DM) 118
ภาพที่ ข3 ข้อต่อเหนือศีรษะ 118
ภาพที่ ข4 แขนหมายเลข 2 และแขนหมายเลข 3 118
ภาพที่ ข5 อุปกรณ์ขับเชิงเส้น 119
ภาพที่ ข6 ส่วนแสดงผล 119
ภาพที่ ข7 โครงสร้างกลไกที่ได้จากแบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว 119
ภาพที่ ค1 โพเทนชิโอมิเตอร์เชิงเส้น GEFRAN PZ34-S-200 120
ภาพที่ ค2 HOHNER Series 21 122
ภาพที่ ค3 NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074 123
ภาพที่ ค4 โมดูล NI 9411 124
ภาพที่ ค5 โมดูล NI 9025 127
ภาพที่ ค6 ส่วนวงจรภายในของ Accelus 131
ภาพที่ ค7 ช่องการเชื่อมต่อสายสัญญาณของ Accelus 132
ภาพที่ จ1 การใช้คำสั่ง fft บน m-file ของโปรแกรม MATLAB 143
ภาพที่ จ2 การใช้คำสั่ง spa บน m-file ของโปรแกรม MATLAB 144
ภาพที่ จ3 แบบจำลองบน MATLAB Simulink 145
ภาพที่ จ4 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับหนึ่ง 146
ภาพที่ จ5 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น White noise 147
ภาพที่ จ6 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Unit step 147
ภาพที่ จ7 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation ... 148
ภาพที่ จ8 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับสอง 149
ภาพที่ จ9 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น White noise 150

หน้า

ภาพที่ จ10 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Unit step 150
ภาพที่ จ11 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation. 151
ภาพที่ จ12 กราฟการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3..... 152
ภาพที่ จ13 สัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่วัดจริง..... 153
ภาพที่ จ14 สัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ได้จากการจำลองใน MATLAB Simulink 153
ภาพที่ จ15 เปรียบเทียบสัญญาณออกที่ได้จากการวัดจริงและการจำลองโมเดล 154

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์หันมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาระบบความปลอดภัยในการขับขี่มากขึ้น เช่น ระบบควบคุมการทรงตัวของรถยนต์ (VSC - Vehicle Stability Control) ระบบป้องกันการลื่นไถล (TRC - Traction Control System) เพื่อช่วยลดอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นแก่ผู้ขับขี่จากการขับขี่ในสภาวะแวดล้อมที่อันตราย โดยระบบเหล่านี้จะต้องทำงานให้สอดคล้องกับการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ ณ ขณะนั้นจึงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาพบว่าการโคลงของรถยนต์ (Vehicle Roll Motion) มีสาเหตุมากมาย ทั้งเกิดจากการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่เองหรืออาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมในการขับขี่ เช่น การขับขี่บนถนนที่มีผิวขรุขระ การขับในสภาวะที่มีลมพัดด้านข้างของรถยนต์ หรือขณะเข้าโค้ง ซึ่งสภาพแวดล้อมลักษณะดังที่กล่าวมาสามารถเป็นสิ่งรบกวนการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ และอาจส่ง ผลให้เกิดอุบัติเหตุได้ในที่สุด ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลงสามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาระบบที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ให้แก่ผู้ขับขี่

การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่นั้นมีอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีการศึกษาในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไป เช่น การศึกษาการบังคับทิศทางเมื่อมีแรงกระทำด้านที่พวงมาลัย หรือการบังคับทิศทางเมื่ อมีแรงลมกระทำด้านข้างรถยนต์ และการศึกษาการบังคับทิศทางขณะเปลี่ยนช่องทางการขับขี่ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการโคลงของรถที่ส่งผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่โดยตรง และผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการโคลงของรถมีผลต่อแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางและพื้นถนนจึงคาดว่าจะส่งผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ด้วย วิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ขณะที่รถยนต์เกิดการโคลง

นอกจากนี้วิธีการศึกษาก็มีความหลากหลาย ทั้งศึกษาจากการจำลองการขับขี่โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) การใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) รวมทั้งการทดลองในสภาวะจริง (Experiment) การศึกษาโดยใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับศึกษาการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกมากกว่าการทำการทดลองในสภาวะจริง (Experiment) และยังสามารถทำสอบโดยมีปฏิกิริยาจริงของผู้ขับขี่ซึ่งดีกว่าการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) จำลองการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ นอกจากนี้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) ยังสามารถสร้างสถาพแวดล้อมในการทดสอบได้หลากหลาย เปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่ต้องการทดสอบได้ง่าย ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้อีกด้วย

การออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองลักษณะการเคลื่อนไหวของยานพาหนะเพื่อให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกเสมือนขับขี่ยานพาหนะอยู่ในสภาวะจริงนั้นมีความสำคัญต่องานวิจัยมาก เนื่องจากการมีระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ซึ่งสามารถจำลองสถานการณ์ได้ดีจะช่วยให้การศึกษาได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุด ปัจจุบันระบบจำลองการเคลื่อนที่มีหลากหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันทั้งจำนวนองศาเสรีและขอบเขตการเคลื่อนที่ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตก ต่างกัน การออกแบบพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่ดีควรออกแบบให้เหมาะสำหรับใช้ในการศึกษางานวิจัยที่ต้องการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำงานวิจัยอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกันได้อีกในอนาคต

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลง (Roll Disturbance) ด้วยระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) 2 องศาอิสระซึ่งเป็นเครื่องมือในการศึกษาที่ใช้ได้สะดวกและเหมาะสำหรับจำลองการโคลงของรถยนต์ สามารถใช้ปฏิกิริยาจริงของผู้ขับขี่ในการทดสอบ รวมทั้งประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอีกด้วย โดยในการทดสอบจะใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์จำลองความถี่ในการโคลงของรถยนต์ตั้งแต่ 1 – 4 Hz และให้ผู้ทดสอบนั่งขับที่ความถี่ต่างๆ ผู้ขับขี่จะจับพวงมาลัยลักษณะเดียวกันทั้งหมดโดยมีทั้งการจับแบบมือเดียวและสองมือ ส่วนการเก็บข้อมูลการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่เพื่อนำมา

วิเคราะห์จะใช้ข้อมูลจากมุมเลี้ยวที่เกิดขึ้นที่พวงมาลัย ผลจากการศึก ษาวิทยานิพนธ์นี้คาดว่าสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาระบบที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 2 องศาอิสระ สำหรับใช้ในการศึกษาการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลง

2. ศึกษาการขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลง เพื่อหาว่าการโคลงของรถยนต์มีผลต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่อย่างไร เมื่อรถยนต์เกิดการโคลงในช่วงความถี่ต่ำที่แตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาการขับขี่ลักษณะเดียวกันนี้โดยเปลี่ยนการจำลองลักษณะรถยนต์เป็นรถสามล้อด้วย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของรถสามล้อขณะที่เกิดการโคลง

3. ศึกษาว่าวิธีการจับพวงมาลัยที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลงอย่างไร โดยพิจารณาการบังคับเลี้ยวในแต่ละตำแหน่งการจับ รวมทั้งวิธีการจับพวงมาลัย เช่น การจับพวงมาลัยมือเดียวด้านข้าง การจับพวงมาลัยสองมือ เป็นต้น รวมทั้งศึกษาจับพวงมาลัยสามล้อที่ระยะห่างจากจุดหมุนที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถสามล้อที่มีการโคลงอย่างไรด้วย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ 2 องศาอิสระเพื่อนำไปใช้ศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์ที่มีการโคลง รวมทั้งออกแบบการทดลองที่จะใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถยนต์กับการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ เมื่อผู้ขับขี่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าว่ารถยนต์จะเกิดการโคลงและไม่มีแรงต้านการบังคับเลี้ยวที่พวงมาลัย เพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่ต้องการศึกษานี้ ในการทดสอบจะใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์และจำลองสัญญาณเข้าของการโคลงของรถยนต์เป็นสัญญาณเข้าแบบขั้นขนาดหนึ่งหน่วย (Unit Step Input) กำหนดให้ผู้ทดสอบจับพวงมาลัยลักษณะ

เดียวกันทั้งหมดโดยมีทั้งการจับแบบมือขวาข้างเดียวและจับแบบสองมือ แล้วทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้งต่อการจับพวงมาลัย 1 แบบ ขณะทดสอบจะเก็บข้อมูลการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่และมุมการโคลงของรถยนต์เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ จากนั้นจึงนำฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่วิเคราะห์จากข้อมูลของผู้ทดสอบแต่ละคนมาเปรียบเทียบกัน เพื่อ ศึกษาว่าการจับพวงมาลัยลักษณะที่แตกต่างกันส่งผลต่อการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่อย่างไร นอกจากนี้จะทำการทดลองลักษณะเดียวกันนี้กับรถสามล้อเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถสามล้อกับมุมการหมุนของพวงมาลัย รวมทั้ง ศึกษาว่าการจับพวงมาลัยที่ตำแหน่งจุดหมุนที่แตกต่างกันส่งผลต่อการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่อย่างไร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาในการดำเนินงานในปีการศึกษา 2554

ขั้นตอน	การดำเนินงาน	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1.	ศึกษาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์แบบต่างๆ และศึกษาการทดสอบบังคับทิศทาง	←	—	→									
2.	ออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีอยู่เดิมให้เหมาะสมกับงาน			←	—	→							
3.	ปรับปรุงโครงสร้างตามที่ออกแบบ รวมทั้งตรวจสอบ					←	—	→					
4.	ติดตั้งระบบควบคุม								←	→			
5.	ออกแบบการทดสอบ และทดสอบ									←	→		
6.	ทดลองหาค่า											←	→
7.	สรุปผลและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์											←	→

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) เป็นเครื่องมือจำลองการขับขี่สำหรับเก็บข้อมูลการขับขี่ลักษณะที่ต้องการแทนการขับขี่ยานพาหนะจริง รวมทั้งใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ในลักษณะต่างๆ ได้ และสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อพิจารณาการขับขี่รถยนต์หลากหลายประเภท

2. นำระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) ไปพัฒนาต่อเพื่อใช้จำลองการขับขี่บนเส้นทางที่อันตราย หรือการทดสอบลักษณะการขับขี่ที่มีความเสี่ยง เพื่อช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ

3. ทราบพฤติกรรมการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ในสภาวะของรถยนต์และรถสามล้อที่มีการโคลง ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปพัฒนาระบบความปลอดภัยในรถยนต์และรถสามล้อได้

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม

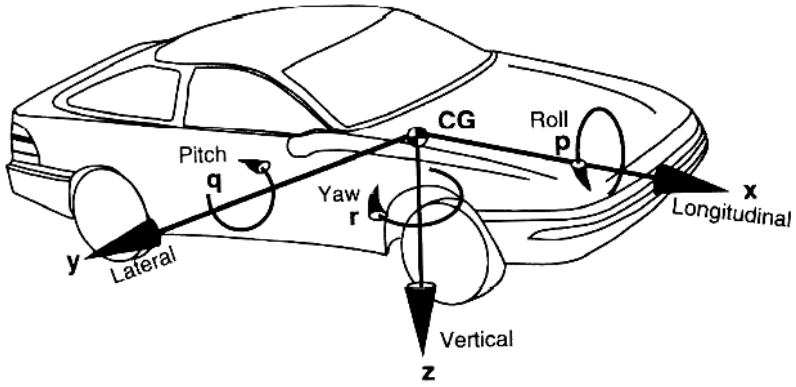
วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการโคลงของรถยนต์ที่มีผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ โดยใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator) ซึ่งประกอบด้วยหลักการจำลองการเคลื่อนที่และลักษณะกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่ ระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ นอกจากนี้จะกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่จากการศึกษางานวิจัยในอดีตซึ่งเกี่ยวข้องกับการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่

2.1 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (Driving Simulator)

ระบบจำลองการเคลื่อนที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองลักษณะการเคลื่อนไหวของยานพาหนะในสถานการณ์จริงเพื่อให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกเสมือนขับขี่ยานพาหนะอยู่ในสภาวะจริงนั้น ปัจจุบันระบบจำลองการเคลื่อนที่มีหลากหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันทั้งจำนวนองศาเสรีและขอบเขตการเคลื่อนที่ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น ทดสอบสมรรถนะรถยนต์ ฝึกฝนนักบินในการขับเครื่องบิน หรือใช้เพื่อความสนุกสนาน แต่สิ่งหนึ่งที่เปรียบเสมือนหัวใจของระบบจำลองการเคลื่ อนที่ก็คือ ความสามารถในการจำลองการเคลื่อนที่ให้เสมือนจริงมากที่สุด ซึ่งต้องอาศัยการเคลื่อนไหวกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่ที่มีความสอดคล้องกับระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์

2.1.1 หลักการจำลองการเคลื่อนที่

การขับรถยนต์บนถนนในสภาวะจริงผู้ขับขี่จะรู้สึกถึงความเร่งในแนวแกน x, y และ z ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งบางสภาวะอาจเกิดความเร่งเพียงแนวแกนใดแนวแกนหนึ่ง และบางสภาวะอาจเกิดความเร่งหลายแนวแกนพร้อมกัน ความเร่งที่เกิดขึ้นนี้สามารถจำลองให้มนุษย์รับรู้ได้ด้วยระบบจำลองการเคลื่อนที่



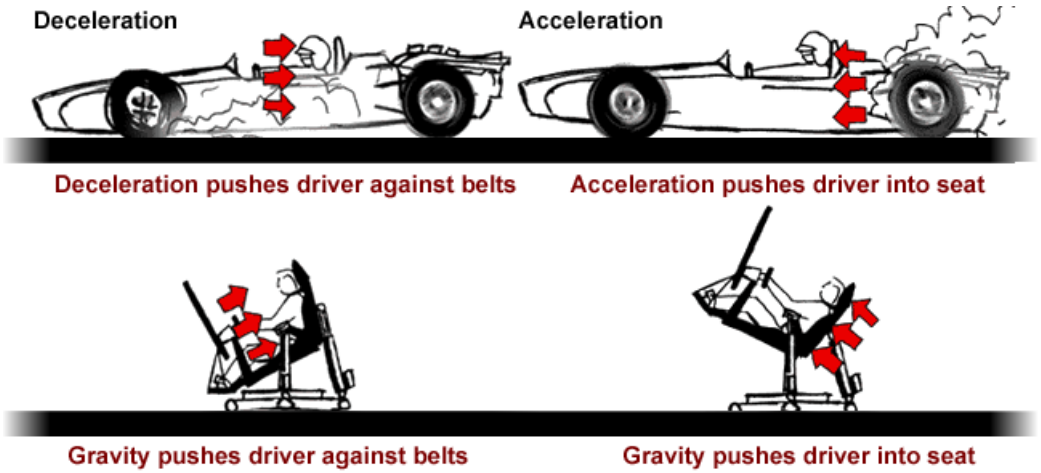
ภาพที่ 1 แสดงแกนอ้างอิง มุมพิทช์ มุมโรล และมุมยอร์วของรถยนต์ (1)

หลักการจำลองการเคลื่อนที่ คือ การสร้างการเคลื่อนไหวของระบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อจำลองความเร่งให้มนุษย์รับรู้ถึงการเคลื่อนไหวนั้นและรู้สึกเสมือนว่าอยู่ในสถานการณ์จริง โดยการจำลองความเร่งสามารถทำได้ 2 วิธี (2) คือ การสร้างความเร่งในแนวที่ต้องการโดยตรง และการสร้างความเร่งโดยอาศัยความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

การสร้างความเร่งในแนวที่ต้องการโดยตรง คือ การจำลองความเร่งด้วยการเคลื่อนที่ระบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดความเร่งเท่ากับความเร่งจริง ตัวอย่างเช่ น ถ้าต้องการจำลองความเร่งด้านหน้า ระบบจำลองการเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าด้วยความเร่งเท่ากับความเร่งที่ต้องการจำลอง การสร้างความเร่งวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถจำลองความเร่งได้ตรงตามที่ต้องการ ส่วนข้อเสียคือการเคลื่อนที่ของระบบจำลองการเคลื่อนที่ต้องใช้พื้นที่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการจำลองความเร่งคงที่

การสร้างความเร่งโดยอาศัยความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก คือ การจำลองความเร่งด้วยการเอียงระบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อให้ผู้ขับขี่ได้รับความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นการสร้างความเร่งเสมือนให้ระบบประสาทการรับรู้ของมนุษย์รับรู้เสมือนว่าถูกเร่งด้วยความเร่งนั้น ดังนั้นความเร่งที่มนุษย์รับรู้จะมีความเสมือนจริงน้อยกว่าการสร้างความเร่งในแนวที่ต้องการโดยตรง แต่การสร้างความเร่งวิธีนี้มีข้อดีคือโครงสร้างกลไกการเคลื่อนที่มีขนาดเล็ก และสามารถสร้างความเร่งคงที่ได้เป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่นการจำลองการเคลื่อนที่ในสภาวะการเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงและความเร่งดังแสดงในภาพที่ 2 ในสภาวะการเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงผู้ขับขี่จะรู้สึก

ถึงความเร่งด้านหน้า กลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่จะเอียงด้านหน้าลงเพื่อให้ผู้ขับขี่ได้รับความเร่งจากแรงโน้มถ่วงด้านหน้า ส่วนในสภาวะการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งผู้ขับขี่จะรู้สึกถึงความเร่งด้านหลัง กลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่จะเอียงด้านหลังลงเพื่อให้ผู้ขับขี่ได้รับความเร่งจากแรงโน้มถ่วงด้านหลัง มุมเอียงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า มุมพิทช์ (Pitch Angle, ϕ) โดยกำหนดมุมพิทช์มีค่าเป็นบวกเมื่อกลไกเอียงด้านหลังลง และมีค่าเป็นลบเมื่อกลไกเอียงด้านหน้าลง การจำลองความเร่งด้านข้างใช้หลักการเดียวกันกับการจำลองความเร่งด้านหน้าและด้านหลัง แต่การเอียงกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่จะเอียงด้านซ้ายและขวาเพื่อให้ผู้ขับขี่รับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นด้านข้าง มุมเอียงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า มุมโรล (Roll Angle, θ) โดยกำหนดมุมโรลมีค่าเป็นบวกเมื่อกลไกเอียงด้านซ้ายของผู้ขับขี่ลง และมีค่าเป็นลบเมื่อกลไกเอียงด้านขวาของผู้ขับขี่ลง



ภาพที่ 2 การเอียงกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าและหลังของผู้ขับขี่ (3)

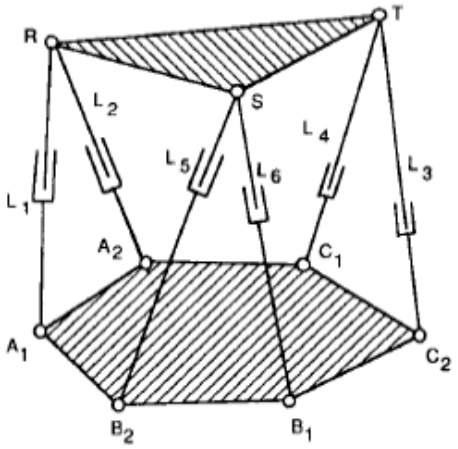
ดังนั้นจากการศึกษาหลักการจำลองการเคลื่อนที่พบว่า การจำลองการเคลื่อนที่ให้มีความเสมือนจริงนั้นจำเป็นต้องอาศัยการเคลื่อนไหวกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่ที่มีความสอดคล้องกับระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์

2.1.2 กลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ

ในปัจจุบันเครื่องจำลองการเคลื่อนที่มีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบต่างมีความเหมาะสมสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน เมื่อจำแนกตามกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบหลัก คือ แบบอนุกรมและแบบขนาน โดยกลไกแบบขนานมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการกระจายโหลดดีกว่าแบบอนุกรม แต่มีความซับซ้อนจึงควบคุมยากกว่าและมีขอบเขตในการเคลื่อนที่จำกัดกว่าแบบอนุกรม ปัจจุบันมีการพัฒนากลไลแบบผสม โดยนำกลไลแบบอนุกรมและแบบขนานมารวมกันเพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่มีอยู่ในกลไกแต่ละแบบ (4) ตัวอย่างกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่มีดังนี้

2.1.2.1 กลไกแบบ 6 องศาอิสระแบบไฮดรอลิก

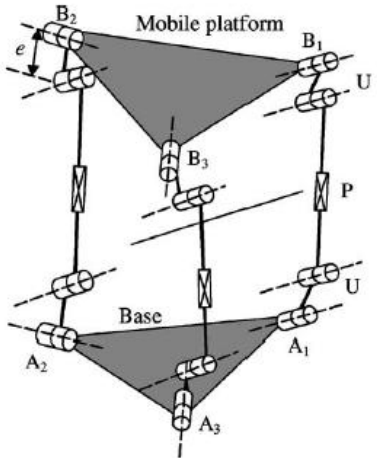
กลไกแบบ 6 องศาอิสระดังแสดงในภาพที่ 3 นี้เป็นกลไกที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการทำวิจัย มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลไกแบบสจ๊วจ กลไกนี้เป็นกลไกแบบขนานประกอบด้วยกลไกหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่า Moving Platform และส่วนที่อยู่นิ่งเรียกว่า Base Platform โดยมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 6 ตัวที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กันอยู่ระหว่างกลไก 2 ส่วนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ลักษณะต่างๆ ข้อดีของกลไกชนิดนี้คือมีการตอบสนองที่ดีสามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ การมีอุปกรณ์ขับเชิงเส้น 6 ตัวจึงสร้างภาระได้สูงและสามารถแบ่งภาระของโหลดที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ขับเคลื่อนมีขนาดเล็ก ส่วนข้อเสียของกลไกชนิดนี้คือราคาสูง และขอบเขตการเคลื่อนที่ของกลไกซึ่งขึ้นกับลักษณะการวางอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้ง 6 ตัว



ภาพที่ 3 กลไกแบบสจ๊วจ (5)

2.1.2.2 กลไกแบบ 3-UPU

กลไกแบบ 3-UPU ดังแสดงในภาพที่ 4 นี้เป็นกลไกแบบขนาน มีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 3 ตัวที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กันอยู่ระหว่างกลไกส่วนที่อยู่นิ่ง (Base Platform) กับส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving Platform) คำว่า UPU ย่อมาจาก Universal-Prismatic-Universal บอกถึงลักษณะข้อต่อต่างๆ โดยเป็นข้อต่อแบบ Universal Joint ระหว่าง ส่วนที่อยู่นิ่งกับ Linkage ล่าง ถัดมาเป็น Linear Joint ระหว่าง Linkage ล่างกับบนโดยมีอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นอยู่ในตำแหน่งนี้ และถัดมามีข้อต่อแบบ Universal Joint ระหว่าง Linkage บนกับส่วนที่เคลื่อนที่ กลไกลักษณะนี้มีข้อจำกัดซึ่งเกิดจากลักษณะการวางแกน จึงจำเป็นต้องพิจารณาการวางแกนหมุนของ Universal Joint ที่ปลาย 2 ด้านของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวเพื่อให้ได้ลักษณะการเคลื่อนไหวที่ต้องการ

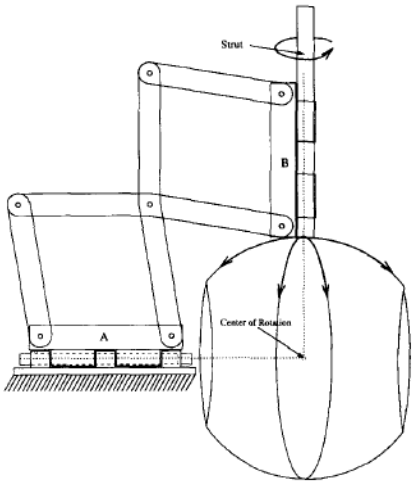


ภาพที่ 4 กลไกแบบ 3-UPU (6)

2.1.2.3 กลไกแบบ CMS

กลไกแบบ CMS (Concentric Multilink Spherical Joint) ดังแสดงในภาพที่ 5 เป็นกลไกแบบอนุกรมมี 3 องศาอิสระซึ่งพัฒนาจากกลไกแบบ Spherical Joint มีจุดเด่นที่ความสามารถในการสร้างการเคลื่อนที่หมุนได้ 3 แนวแกนโดยแนวแกนทั้งหมดตัดกันที่จุดหมุนเดียวกัน นอกจากนี้ยังเป็นกลไกที่มีขอบเขตในการเคลื่อนที่สูง สามารถควบคุมการจำลองแต่ละแนวแกนได้อย่างอิสระซึ่งส่งผลให้การจำลองการเคลื่อนไหวมีความเสมือนจริงมาก และยังสามารถออกแบบ

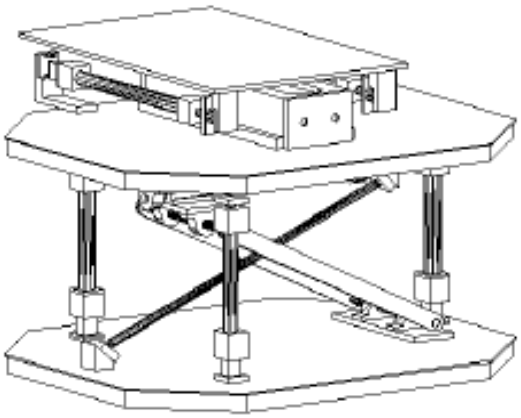
ให้สอดคล้องกับระบบรับรู้ของมนุษย์ได้มากที่สุดด้วย ส่วนข้อจำกัดอยู่ที่การรับภาระมากของอุปกรณ์ขับเคลื่อน เนื่องจากไม่สามารถกระจายภาระเหมือนกลไกแบบขนาน ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ขับที่มีขนาดใหญ่ (2)



ภาพที่ 5 กลไกแบบ CMS (7)

2.1.2.4 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ

กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระดังแสดงในภาพที่ 6 โครงสร้างกลไกระหว่างฐานด้านล่าง (Base Platform) และฐานกลาง (Middle Platform) เป็นกลไกแบบขนานซึ่งมี 3 องศาอิสระ มีอุปกรณ์ขับ 3 ตัวซึ่งเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และตัวขับอีกหนึ่งตัววางเอียงมีข้อต่อด้านหนึ่งเป็น Prismatic Joint ต่อกับฐานด้านล่างและข้อต่ออีกด้านเป็น S-Joint ต่อกับฐานกลาง การกระจัดที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z หมุนรอบแกน X และแกน Y ส่วนโครงสร้างกลไกระหว่างฐานกลางกับฐานด้านบน (Moving Platform) เป็นกลไกแบบอนุกรมมี 2 องศาอิสระ มี Revolute Joint กับ Prismatic Joint ที่มีตัวขับติดตั้งอยู่เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และหมุนรอบแกน Z จุดเด่นของกลไกนี้คือสามารถใช้อุปกรณ์ขับขนาดเล็กกับกลไกแบบอนุกรมได้เนื่องจากมีกลไกแบบขนานด้านล่างช่วยรับแรง



ภาพที่ 6 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ (8)

2.2 การรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

เนื่องจากการจำลองการเคลื่อนที่ให้มีความเสมือนจริงจึงจำเป็นต้องอาศัยการเคลื่อนไหวกลไกของระบบจำลองการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกับระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์ ดังนั้นการศึกษาระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์จึงมีความสำคัญสำหรับการพัฒนาระบบจำลองการเคลื่อนที่ให้มีความเสมือนจริง

ระบบรับรู้การเคลื่อนที่เป็นระบบที่ทำให้มนุษย์ทราบสภาวะของร่างกายและสภาพแวดล้อมที่เป็นอยู่ขณะนั้น ประกอบด้วย 2 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบประสาท ซึ่งเป็นส่วนประมวลผล โดยรับความรู้สึกจากเซลล์ที่อวัยวะต่างๆของร่างกายมาให้สมองวิเคราะห์และแปลความรู้สึกนั้นให้มนุษย์ทราบสภาวะที่เกิดขึ้นขณะนั้น และอีกระบบหนึ่งคือ ระบบการทรงตัว ซึ่งเกี่ยวกับเสถียรภาพ สภาพแวดล้อม และแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับร่างกาย โดยได้รับข้อมูลจากระบบการมองเห็น กล้ามเนื้อและข้อต่อ และระบบรับรู้ความเร่งซึ่งอยู่บริเวณหูชั้นใน เพื่อแปลความให้มนุษย์ทราบสภาวะที่เป็นอยู่ขณะนั้น (9)

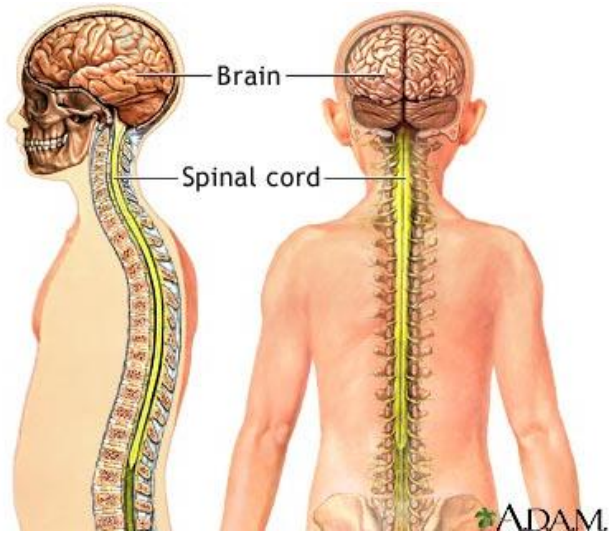
2.2.1 ระบบประสาท

ระบบประสาทเป็นระบบควบคุมการทำหน้าที่ของอวัยวะต่างๆ ในทุกระบบให้ทำงานประสานกัน เพื่อให้ร่างกายสามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกได้ ส่งผลให้

มนุษย์มีพฤติกรรมการดำรงชีวิตอยู่ได้ตามปกติ นอกจากนี้ระบบประสาทยังเป็นแหล่งที่มาของความคิดความจำ ความรู้สึก สติปัญญา ความฉลาด ไหวพริบ ปฏิภาณ การตัดสินใจ การใช้เหตุผล การแสดงอารมณ์ และการสื่อสัมผัสต่างๆ อีกด้วย ระบบประสาทสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

2.2.1.1 ระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System)

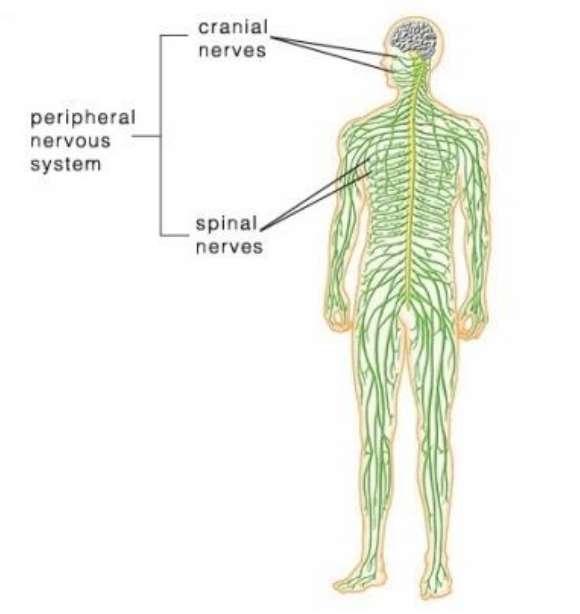
ประกอบด้วย สมอง (Brain) และไขสันหลัง (Spinal Cord) ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยสมองทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่ส่งมาจากไขสันหลัง และควบคุมการทำงานของอวัยวะต่างๆ



ภาพที่ 7 สมอง (Brain) และไขสันหลัง (Spinal Cord) (10)

2.2.1.2 ระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral Nervous System)

ประกอบด้วยเส้นประสาทสมอง (Cranial Nerve) จำนวน 12 คู่ และเส้นประสาทไขสันหลัง (Spinal Nerve) จำนวน 31 คู่ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เส้นประสาทสมอง (Cranial Nerve) และเส้นประสาทไขสันหลัง (Spinal Nerve)

2.2.1.3 ระบบประสาทอัตโนมัติ (Autonomic Nervous System)

เป็นระบบประสาทที่ควบคุมการทำงานของอวัยวะต่างๆซึ่งอยู่นอกเหนือการบังคับของจิตใจ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ ระบบประสาทซิมพาเตติก (Sympathetic) และระบบประสาทพาราซิมพาเตติก (Parasympathetic)

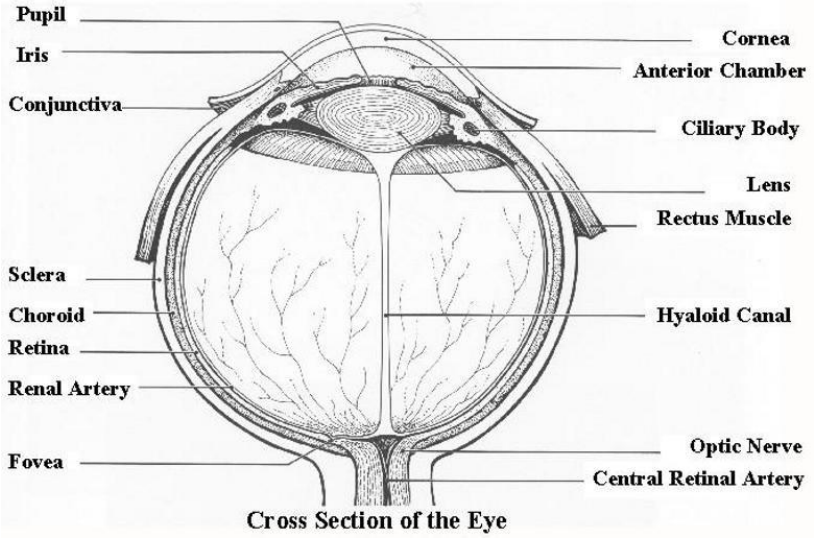
2.2.2 ระบบการทรงตัว

ระบบการทรงตัวเป็นระบบที่ทำให้มนุษย์รับรู้ถึงเสถียรภาพ สภาวะแวดล้อม และแรงที่เกิดขึ้นกับร่างกาย ซึ่งสามารถอธิบายจากการจำลองการขับรถยนต์ขณะผู้ขับขี่เร่งความเร็วเพิ่มขึ้น ผู้ขับขี่จะรู้ถึงแรงผลักจากทางด้านหน้าทำให้บริเวณแผ่นหลังของผู้ขับขี่สัมผัสกับเบาะที่นั่งมากขึ้น ระบบภายในหูชั้นในช่วยให้ผู้ขับขี่รับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้น ส่วนระบบการมองเห็นทำให้ผู้ขับขี่เห็นสิ่งแวดล้อมภายนอกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ระบบการทรงตัวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.2.2.1 ระบบการมองเห็น (Vision System)

ในระบบประสาทรับความรู้สึกการมองเห็นเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการดำรงชีวิต มนุษย์และสัตว์รับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงรอบตัวจากการกระตุ้นผ่านทางตาซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 9 การมองเห็นภาพต่างๆ เกิดจากการสะท้อนของแสงที่กระทบกับวัตถุเข้าสู่

นัยน์ตา ทำให้ทราบรูปร่าง สี และการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยแสงจะผ่านรูม่านตา (Pupil) หักเหและรวมแสงโดยกระจกตา (Cornea) และเลนส์ (Lens) แล้วตกกระทบบนตัวรับที่ไวต่อแสงบริเวณจอตา (Retina) จากนั้นข้อมูลภาพจะถูกส่งไปยังศูนย์กลางของการมองเห็นในสมองเพื่อแปลความหมาย



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของระบบการมองเห็น

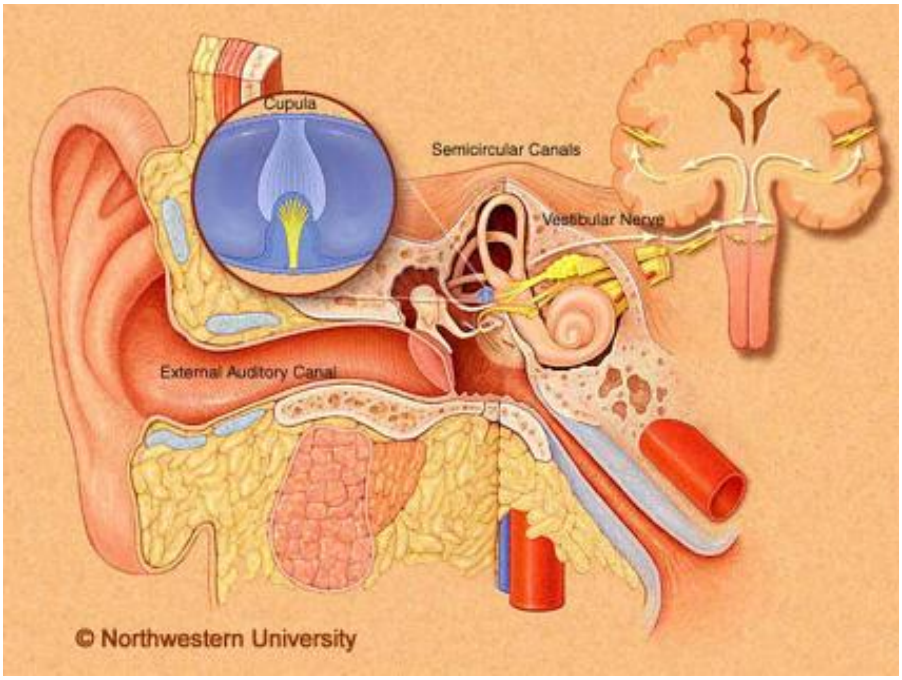
2.2.2.2 ระบบการรับความรู้สึกของกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception System)

ระบบนี้ทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ ความดัน และขนาดแรงที่เกิดขึ้นบนร่างกาย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนรับรู้ความดันและการสั่น (Discriminative Touch) ใช้เส้นประสาทใต้ผิวหนังรับรู้ข้อมูลความถี่สูง ส่วนการรับรู้ความเจ็บปวดและอุณหภูมิ (Pain and Temperature) ใช้เส้นประสาทใต้ผิวหนังรับข้อมูลและส่งมารวมที่ไขกระดูกสันหนังแล้วส่งต่อไปยังสมอง ส่วนรับรู้เกี่ยวกับกล้ามเนื้อ (Proprioception) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งและอุปกรณ์วัดแรงที่กระทำบนร่างกาย

2.2.2.3 ระบบการรับรู้ความเร่ง (Vestibular System)

ส่วนการรับรู้ความเร่งของมนุษย์ดังภาพที่ 10 ประกอบด้วย ส่วนรับรู้ความเร่งเชิงมุม (Semicircular Canal) และส่วนรับรู้ความเร่งเชิงเส้น (Otolith Organ) อวัยวะส่วนนี้จะอยู่บริเวณหู

ชั้นในทั้งสองข้าง โดย Semicircular Canal ประกอบไปด้วย Superior Canal, Posterior Canal และ Lateral Canal ทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงมุมทั้ง 3 แนวแกน ส่วน Otolith Organ ประกอบด้วย Utricle และ Saccule ทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงเส้นทั้ง 3 แนวแกน



ภาพที่ 10 ระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์ (Vestibular System)

กรณีสมองได้รับข้อมูลที่ขัดแย้งกันระหว่างระบบการมองเห็นและระบบรับรู้ความเร่ง ทำให้มนุษย์เกิดอาการผิดปกติ เช่น อาการเมารถและทำให้อาเจียน ดังนั้นการออกแบบระบบจำลองการเคลื่อนที่ควรคำนึงถึงเรื่องนี้ร่วมด้วย

นอกจากนี้การศึกษาเกี่ยวกับขีดจำกัดการรับรู้ความเร่ง (Motion Threshold) ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ จากการศึกษางานวิจัยของ Clark และ Stewart (11) กับผู้ทดสอบเพศชายจำนวน 18 คนพบว่าขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งในการหมุนรอบแกน x (Roll Threshold) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 – 1.02 องศาต่อวินาทีกำลังสอง และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.41 องศาต่อวินาทีกำลังสอง ขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งในการหมุนรอบแกน y (Pitch Threshold) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.06 – 2.24 องศาต่อวินาทีกำลังสอง และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.67 องศาต่อวินาทีกำลังสอง ขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งในการหมุนรอบแกน z (Yaw

Threshold) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 – 0.87 องศาต่อวินาทีกำลังสอง และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.41 องศาต่อวินาทีกำลังสอง ส่วนงานเขียนของ Groen และ Jongkees (12) ซึ่งทำการศึกษาขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งเชิงมุมประมาณ 2 องศาต่อวินาทีกำลังสอง และขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งเชิงมุมต่ำสุดอยู่ที่ 0.5 องศาต่อวินาทีกำลังสอง จากวิทยานิพนธ์ของเด่น จันทร์ทองอ่อน (2) ที่มีการศึกษาขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งเชิงมุมทั้งสามแนวแกนพบว่า มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ความเร่งที่น้อยกว่า 2 องศาต่อวินาทีกำลังสองได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับขีดจำกัดการรับรู้ความเร่งสามารถสรุปได้ว่า ขีดจำกัดของการรับรู้ความเร่งทั้งสามแนวแกนของมนุษย์อยู่ที่ประมาณ 2 องศาต่อวินาทีกำลังสอง ดังนั้นการออกแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ควรออกแบบให้มีความเร่งทั้งสามแนวแกนมากกว่าขีดจำกัดนี้ เพื่อให้ผู้ขับขี่สามารถรู้สึกถึงการเคลื่อนไหวอย่างเสมือนจริง

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่จำเป็นต้องมีสิ่งกระตุ้นที่มีผลทำให้การบังคับทิศทางเปลี่ยนไป โดยสิ่งกระตุ้นที่จะนำมาศึกษานั้นเป็นสิ่งรบกวนที่ผู้ทำวิจัยคาดว่าจะมีผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ เมื่อมีสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในระหว่างการขับขี่ยานยนต์ ผู้ขับขี่แต่ละคนจะถูกกระตุ้นจากสิ่งรบกวนมากน้อยแตกต่างกันไป ประสบการณ์ในการขับขี่ของผู้ขับขี่ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่ทำให้การบังคับทิศทางที่เกิดขึ้นเมื่อมีสิ่งรบกวนนั้นแตกต่างกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมทิศทางได้แก่ แรงต้านแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพวงมาลัย การขับขี่ที่มีลมพัดกระทบด้านข้างของรถยนต์ ลักษณะถนนที่มีความเรียบและขรุขระแตกต่างกัน การเข้าโค้งและการเปลี่ยนช่องทางขณะขับขี่ (13)(14)(15)(16)

Pick และ Cole (13) ทำการศึกษาพลศาสตร์ของแขนของผู้ขับขี่ที่จับพวงมาลัยโดยใช้ทอร์กแบบสุ่มเป็นสัญญาณรบกวนในการบังคับทิศทางของพวงมาลัย งานวิจัยได้จำลองโมเดลแขนเป็นโมเดลเชิงเส้นที่มี 1 องศาอิสระของสปริงและแดมเปอร์ (Single-degree-of-freedom linear mass-spring-damper model) เพื่อใช้ในการทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 6 เฮิร์ซ การ

วัดผลการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ใช้ข้อมูลค่าความแข็งของสปริง (Stiffness) และค่าความหน่วงของแดมเปอร์ (Damping) ของกล้ามเนื้อแขนจากผู้ทดสอบ 8 คน ขณะที่แขนปล่อยตามสบายกับขณะที่มีการเกร็ง ผลจากงานวิจัยนี้ได้นำไปพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างยานยนต์กับผู้ขับขี่ (Mathematical models of vehicle-driver dynamic interaction)

จากงานวิจัยดังกล่าว (13) ได้จำลองโมเดลแขนเป็นโมเดลเชิงเส้นที่มี 1 องศาอิสระของสปริงและแดมเปอร์ (Single-degree-of-freedom linear mass-spring-damper model) เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา ซึ่งผลการทดลองที่แสดงในรูปผลการตอบสนองเชิงความถี่จากโมเดลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีความถี่ธรรมชาติหนึ่งตำแหน่งที่ความถี่ไม่เกิน 5 เฮิร์ซ

การศึกษาการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่เมื่อมีลมพัดกระทบด้านข้างของรถยนต์โดย Dettki (14) เป็นการศึกษาความปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับผู้ขับขี่ผ่านทางการบังคับเลี้ยว และวัดการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่จากการเลี้ยวของรถยนต์ โดยในการ ศึกษาจะให้ผู้ทดสอบขับรถยนต์เป็นเส้นทางตรง (On-centre handling) ขณะที่มีลมพัดกระทบด้านข้างรถแล้ววัดค่ามุมยอร์วของรถยนต์ที่เกิดขึ้น เพื่อใช้เป็นตัววัดปฏิกิริยาในการขับขี่ของผู้ขับขี่ การทดสอบตามงานวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถหาโมเดลการบังคับเลี้ยวผู้ขับขี่เมื่อมีแรงกระทำบนรถยนต์

นอกจากนี้งานวิจัยในอดีตมี Mashadi และ Crolla (15) ทำการศึกษาลักษณะถนนซึ่งมีผลต่อการขับขี่ โดยทดสอบการขับขี่บนถนนเรียบ ขรุขระ และขรุขระมาก เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่าการขับบนถนนที่มีความขรุขระมากจะทำให้แรงปฏิกิริยาที่พื้นมีความผันผวนมากและส่งผลให้เกิดการไวโค้งได้ (Oversteer) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหากสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป โดยมีความถี่มากขึ้นหรือแอมพลิจูดมากขึ้นจะส่งผลต่อการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ด้วย

จากการงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมทิศทางของผู้ขับขี่พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่มีมากมาย เช่น การเกิดสิ่งรบกวนบนพวงมาลัย สิ่งรบกวนต่อโครงสร้างรถยนต์ ลักษณะถนน การเข้าโค้งและการเปลี่ยนช่องทางขณะขับขี่ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการโคลงของรถที่ส่งผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่โดยตรง และปัจจัยที่กล่าวมานี้ก็มีผลต่อแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางและพื้นถนนจึงคาดว่าจะส่งผลต่อการบังคับทิศทางของผู้ขับขี่ด้วย วิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาการ

บังคับทิศทางของผู้ขับขี่ขณะที่รถยนต์เกิดการโคลง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาโมเดลผู้ขับขี่ (Driver's Model) และใช้ในการพัฒนาระบบความปลอดภัยของรถ

บทที่ 3
การออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนกลไกการเคลื่อนไหว ส่วนการแสดงภาพ และส่วนแสดงเสียง ในบทนี้มีจะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ ประกอบด้วยการกำหนดขอบเขตและแนวคิดในการออกแบบ การนำเสนอรูปแบบของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่หลากหลายเพื่อเปรียบเทียบจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละรูปแบบและเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปพัฒนาโครงสร้างจริงของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ที่ต้องการศึกษาผลของการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เกิดจากการโคลงของรถยนต์ ดังนั้น ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่จะออกแบบและพัฒนานี้จึงเป็นระบบที่มี 2 องศาอิสระซึ่งสามารถจำลองการโคลงของรถยนต์ได้

3.1 การกำหนดขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

การกำหนดขอบเขตของระบบจำลองการเคลื่อนต้องพิจารณาควา มเหมาะสมกับวัตถุประสงค์และขอบเขตการใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์จะนำระบบจำลองการเคลื่อนที่ไปใช้ศึกษาผลของการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เกิดจากการโคลงของรถยนต์ ดังนั้นการกำหนดขอบเขตจึงคำนึงถึงมุมเอียงที่ต้องการจำลอง การกำหนดจุดยึดและจุดหมุน ลักษณะกลไกที่เหมาะสม รวมทั้งภาระที่มีบนชิ้นส่วนและกลไกเพื่อให้ได้ความเร่งที่เสมือนจริงมากที่สุด นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสะดวกที่จะนำระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์นี้ไปพัฒนาประยุก ต์ใช้กับงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ในอนาคตได้

3.1.1 การกำหนดขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

เนื่องจากการจำลองความเร่งอาศัยการเอียงโครงสร้างและความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อสร้างความเร่งเสมือนให้มนุษย์รู้สึกเสมือนว่าถูกเร่ง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้อง

ทราบขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลที่ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ต้องใช้จำลองความเร่งในแต่ละสภาวะ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านหน้ากับมุมพิทช์ที่ต้องจำลองแสดงในสมการที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมโรลที่ต้องจำลองแสดงในสมการที่ 2 ดังนี้

$$\text{Pitch Angle } (\phi) = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (1)$$

$$\text{Roll Angle } (\theta) = \sin^{-1}\left(\frac{a_y}{g \cdot \cos(\phi)}\right) \quad (2)$$

3.1.1.1 พิจารณาการทดสอบขับรถยนต์ในสภาวะทั่วไปบนถนน

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เกิดจากการโคลงของรถยนต์ในสภาวะการขับขี่ทั่วไปบนถนน ดังนั้นขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ควรครอบคลุมมุมที่ใช้จำลองความเร่งในการขับขี่ทั่วไป จากโครงการวิจัยการพัฒนารูปแบบใหม่ของระบบประเมินพลศาสตร์ยานยนต์ การขับขี่และระบบชิ้นส่วนยานยนต์ (4) ได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลความเร่งในแนวแกน x, y และ z ที่เกิดขึ้นบนรถยนต์ขณะขับรถยนต์ในสภาวะที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สภาวะประกอบด้วย การขับรถยนต์บนถนนทางเรียบโดยใช้ความเร็วปกติ การขับรถยนต์บนถนนทางเรียบในสภาวะที่มีการจราจรติดขัด การขับรถยนต์บนถนนที่มีเนินระนาด และการขั บรถยนต์บนถนนทางขรุขระ และนำข้อมูลความเร่งที่ได้นำมาผ่านการกรอง (Filter) ที่ระดับ 1 Hz ด้วยโปรแกรม SIMULINK ของ MATLAB เพื่อลดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่ต้องการใช้จริง

- *การขับรถยนต์บนถนนทางเรียบโดยใช้ความเร็วปกติ*

ในการทดสอบนี้ใช้อัตราเร็วระหว่าง 20 – 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยขับด้วยความเร็วแบบสม่ำเสมอ พบว่าค่าความเร่งในแนวแกน x (ความเร่งด้านหน้า) อยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 0.2g (0 – 1.96 m/s^2) และค่าความเร่งในแนวแกน y (ความเร่งด้านข้าง) อยู่ในช่วงระหว่าง -0.2g ถึง 0.2g (1.96 m/s^2)

- *การขับรถยนต์บนถนนทางเรียบในสภาวะที่มีการจราจรติดขัด*

ในการทดสอบนี้ใช้อัตราเร็วระหว่าง 0 – 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และขับในสภาวะที่มีการจราจรติดขัด ค่าความเร่งในแนวแกน x อยู่ในช่วงระหว่าง -0.1g ถึง 0.1g (0.98 m/s^2) และค่าความเร่งในแนวแกน y อยู่ในช่วงระหว่าง -0.3g ถึง 0.3g (2.94 m/s^2)

- *การขับรถยนต์บนถนนที่มีเนินระนาด*

ในการทดสอบนี้ใช้อัตราเร็วขณะขับขึ้นเนินประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าความเร่งในแนวแกน x อยู่ในช่วงระหว่าง -0.2g ถึง 0.2g (1.96 m/s^2) และความเร่งในแนวแกน y อยู่ในช่วงระหว่าง -0.35g ถึง 0.35g

- *การขับรถยนต์บนถนนทางขรุขระ*

ในการทดสอบนี้สภาพผิวถนนมีลักษณะเป็นหลุมและมีก้อนกรวด ทำให้ค่าความเร่งที่วัดได้มีผลจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากผิวถนนที่ขรุขระร่วมด้วย ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงไม่สัมพันธ์กับลักษณะการเคลื่อนที่จริงของรถยนต์ ซึ่งค่าความเร่งในแนวแกน x วัดได้ประมาณ 0.3g และค่าความเร่งในแนวแกน y วัดได้ประมาณ 0.3g

จากค่าความเร่งที่เกิดขึ้นบนรถยนต์ซึ่งได้จากการทดสอบขับรถยนต์ในสภาวะที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สภาวะพบว่ามุมพิทช์มากที่สุดซึ่งต้องจำลองความเร่งด้านหน้าอประมาณ 18 องศา และมุมโรลมากที่สุดซึ่งต้องจำลองความเร่งด้านหน้าอยู่ที่ประมาณ 18.5 องศา ดังนั้นขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ต้องสามารถจำลองมุมในช่วงนี้ได้ด้วย

<u>3.1.1.2 พิจารณาจากระบบจำลองการขับขี่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน</u>

ในอุตสาหกรรมยานยนต์การทดสอบสมรรถนะของรถยนต์จะใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น ทดสอบเสถียรภาพ (Stability) ทดสอบพลศาสตร์ยานยนต์ (Dynamics) ทดสอบการควบคุมทิศทาง (Handling) และทดสอบความสบายในการขับขี่ (Ride Comfort) ซึ่งระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีช่วงมุมพิทช์และมุมโรลดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 11

ตารางที่ 2 ตารางแสดงมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีในปัจจุบัน

ระบบจำลองการขับขี่	มุมพิทช์ (องศา)	มุมโรล (องศา)
In Motion 2 DOF (17)	±25	±25
In Motion 3 DOF (17)	±25	±25
In Motion 6 DOF (17)	±30	±35
MB-EP-6DOF (18)	-29.3 / +32.9	±25.1
MB-E-6DOF (18)	-27.4 / +31.6	±23.8
Force Dynamics 401 (3)	±30	±30

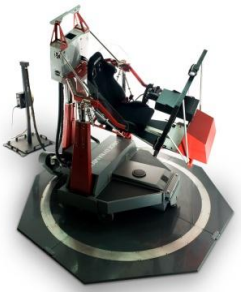
(a) In Motion 2 DOF

(b) In Motion 3 DOF

(c) In Motion 6 DOF

(d) MB-EP-6DOF

(e) MB-E-6DOF



(f) Force Dynamics 401

ภาพที่ 11 ตัวอย่างระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีในปัจจุบัน

จากการศึกษาขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ในปัจจุบันพบว่า มีขนาดมุมพิทช์อยู่ในช่วงประมาณ ±28 องศา และมุมโรลอยู่ในช่วงประมาณ ±30 องศา ดังนั้นขอบเขตของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ควรสามารถจำลองมุมโดยมีช่วงใกล้เคียงระบบจำลองในกลุ่มตัวอย่างนี้ นอกจากนี้การกำหนดขอบเขตควรพิจารณาว่าระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์นี้สามารถพัฒนาไปใช้ในการทดสอบอื่นๆ ได้อีกในอนาคต

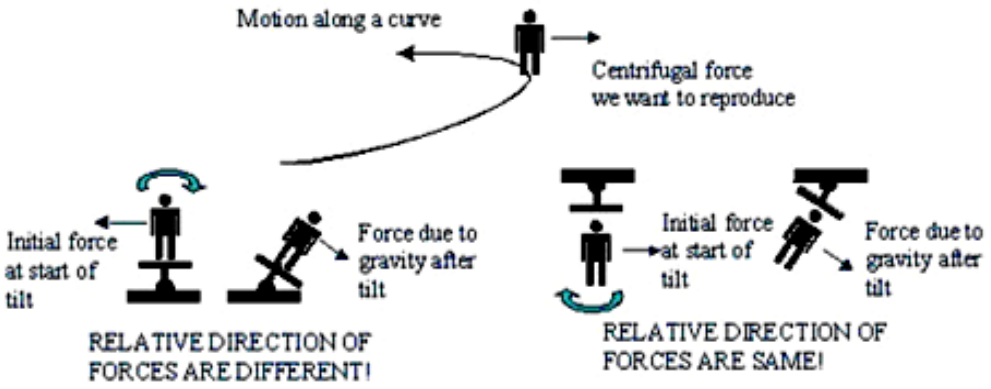
จากข้อมูลที่พิจารณาจากการขับขี่ทั่วไปบนท้องถนนและการศึกษาระบบจำลองที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถสรุปได้ว่า ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ควรมีขนาดของมุมพิทช์ ±25 องศาและมุมโรล ±40 องศา เพื่อครอบคลุมการจำลองการขับขี่ทั่วไปบนท้องถนน และเหมาะสมต่อกา รใช้ศึกษาผลของการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เกิดจากการโคลงของรถยนต์ รวมทั้งสามารถพัฒนาไปใช้ในการทดสอบอื่นๆ ได้ในอนาคต

3.1.2 การกำหนดจุดหมุนของกลไกในระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

จุดหมุนของกลไกเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อความเสมือนจริงในการจำลองความเร่ง จากการศึกษาการออกแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ (19) พบว่าการเอียงรอบจุดหมุนใดๆ ส่งผลอย่างมากต่อการสร้างความรู้สึกเสมือนจริงของมนุษย์ เนื่องจากตำแหน่งของจุดหมุนมีผลต่อการเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของมนุษย์ โดยแรงนี้เกิดจากระบบในร่ายกายที่พยายามรักษาตำแหน่งเดิมของร่างกายและเกิดขึ้นในขณะเริ่มต้นเอียงกลไกไปจากแนวเดิม ซึ่งความแตกต่างของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งจุดหมุนสามารถอธิบายได้ดังนี้

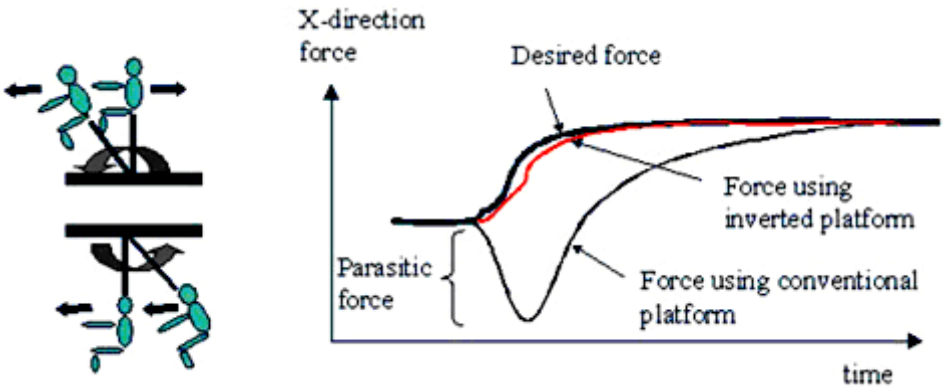
จากภาพที่ 12 ยกตัวอย่างสภาวะขณะขับขี่บนถนนจริงโดยผู้ขับขี่กำลังเลี้ยวรถยนต์ไปทางซ้าย ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ไปทางขวากระทำที่ร่างกายของผู้ขับขี่ การจำลองแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำบนร่างกายของผู้ขับขี่เพื่อให้รู้สึกเหมือนกำลังเคลื่อนที่สภาวะเดียวกันนี้สามารถทำได้โดยเอียงโครงสร้างที่นั่งของผู้ขับขี่ให้ร่างกายรับแรงโน้มถ่วงของโลกแทนแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในสภาวะจริง จะเห็นว่าการเอียงโดยกำหนดจุดหมุนอยู่ใต้ศีรษะของผู้ขับขี่ทำให้เกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ขณะเริ่มต้น (Initial Force) ทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่ใช้จำลองแทนแรงหนีศูนย์กลางในสภาวะจริง แต่เมื่อกำหนดจุดหมุนอยู่เหนือศีรษะของผู้

ขับขี่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ขณะเริ่มต้นจะมีทิศเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่ใช้จำลองแทนแรงหนีศูนย์กลางในสภาวะจริง



ภาพที่ 12 แสดงแรงต้านทางการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดตำแหน่งจุดหมุนที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 13 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงโน้มถ่วงที่ใช้จำลองแรงหนีศูนย์กลางในสภาวะจริง จะเห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดจุดหมุนให้อยู่เหนือศีรษะของผู้ขับขี่จะใกล้เคียงกับแรงที่ต้องการ (Desired Force) มากกว่าแรงที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดจุดหมุนให้อยู่ใต้ศีรษะของผู้ขับขี่ ดังนั้นการกำหนดจุดหมุนให้อยู่เหนือศีรษะของผู้ขับขี่จะทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด



ภาพที่ 13 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงที่จำลองได้กับแรงที่ต้องการ
เมื่อกำหนดตำแหน่งจุดหมุนที่แตกต่างกัน

3.1.3 การกำหนดลักษณะกลไกสำหรับระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

กลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบหลัก คือ แบบอนุกรมและแบบขนาน ปัจจุบันมีการพัฒนากลไลแบบผสมเพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่มีอยู่ในกลไกแต่ละแบบ ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดและตัวอย่างลักษณะกลไกแบบต่างๆ แล้วในบทที่ 2 จากการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์สำหรับทดสอบสมรรถนะของรถยนต์และการประยุกต์ใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ในงานประเภทต่างๆ พบว่ากลไกแบบขนานเป็นที่นิยมมากกว่ากลไกแบบอนุกรม เนื่องจากมีจุดเด่นทั้งในเรื่องความแข็งแรงและความสามารถในการกระจายโหลดดีกว่าแบบอนุกรม จึงช่วยลดขนาดของอุปกรณ์ขับที่ใช้ให้อยู่ในช่วงที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

จากการพิจารณากลไกลักษณะต่างๆ และข้อจำกัดที่มีอยู่พบว่า กลไกที่เหมาะสมสำหรับระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่ออกแบบนี้คือ กลไกขนานแบบ 3-UPU โดยนำมาประยุกต์ให้เป็นกลไกที่มี 2 องศาอิสระ และเหมาะสมกับอุปกรณ์ขับที่มีอยู่

3.1.4 การกำหนดลักษณะโครงสร้างของโครงสร้างที่นั่ง

โครงสร้างที่นั่งเป็นโครงสร้างสำหรับรองรับน้ำหนักทั้งหมดของผู้ขับขี่และรับแรงกระทำจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนซึ่งมีผลต่อกลไกการเคลื่อนไหวและความปลอดภัยของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ ดังนั้นการออกแบบลักษณะโครงสร้างที่นั่งจึงเป็นสิ่งหนึ่งที่ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับการกำหนดขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างลักษณะต่างๆ พบว่าโครงสร้างแบบสเปสเฟรม (Space Frame) มีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่นั่ง เนื่องจากโครงสร้างลักษณะ นี้มีจุดเด่น คือ มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา จะช่วยลดภาระที่กระทำบนชิ้นส่วนกลไกและทำให้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์มีการเคลื่อนไหวที่ดี

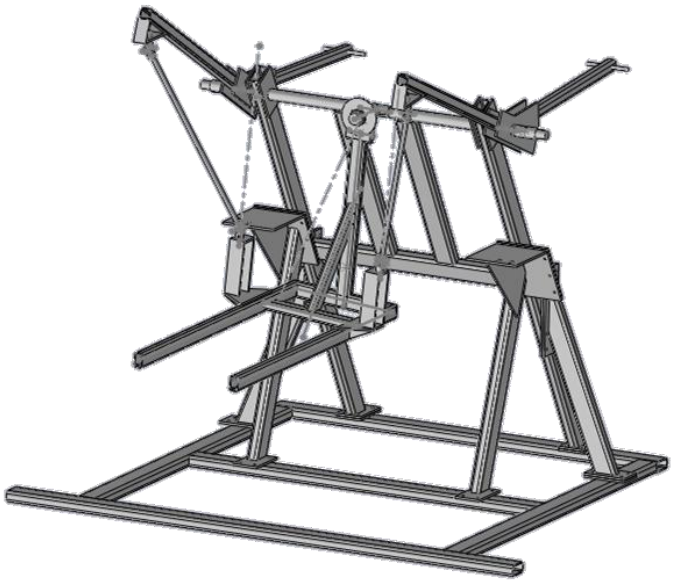
3.2 รูปแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

เมื่อกำหนดขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์แล้ว จึงพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เดิมที่มีอยู่ โดยปรับปรุงระบบเดิมให้มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบความสบายที่

ความถี่ต่ำ รวมทั้งเสนอรูปแบบใหม่ซึ่งมีกลไกที่ต่างไปจากของเดิม เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการออกแบบรูปแบบของร ะบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ทั้ง 3 รูปแบบใช้กลไกขนานแบบ 3-UPU มาดัดแปลงให้มี 2 องศาอิสระ ใช้อุปกรณ์ขับเชิงเส้น (Linear Actuator) 2 ตัว และกำหนดจุดหมุนของโครงสร้างที่นั่งให้อยู่บริเวณเหนือศีรษะของผู้ขับขี่ ส่วนความแตกต่างในแต่ละรูปแบบ คือ ลักษณะโครงสร้างที่นั่ง จุดยึดของอุปกรณ์ขับเชิงเส้น และลักษณะกลไกควบคุมการเคลื่อนไหว ทำให้มีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน

3.2.1 **ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่** 1

ระบบจำลองการขับขี่รูปแบบที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 14 นี้เป็นระบบจำลองเดิมที่ออกแบบไว้ในโครงงานการออกแบบและสร้างเครื่องจำลองการขับขี่ยานยนต์แบบ 2 ระดับขั้นเสรี (20) กลไกควบคุมการเอียงมุมพิทช์และมุมโรลอาศัยอุปกรณ์ขับเชิงเส้นซึ่งมีช่วงชัก (Stroke) 200 มิลลิเมตร ดันและดึงผ่านแขนหมายเลข 3 เพื่อควบคุมแขนหมายเลข 2 ซึ่งมีข้อต่ออยู่ด้านข้างของโครงสร้างที่นั่งอีกต่อหนึ่ง จากการศึกษาผลการทดสอบของโครงงานพบว่ามีขนาดมุมพิทช์ลง 18 องศา มุมพิทช์ขึ้น 40 องศา และมีมุมโรลเท่ากับ $\pm$38 องศา



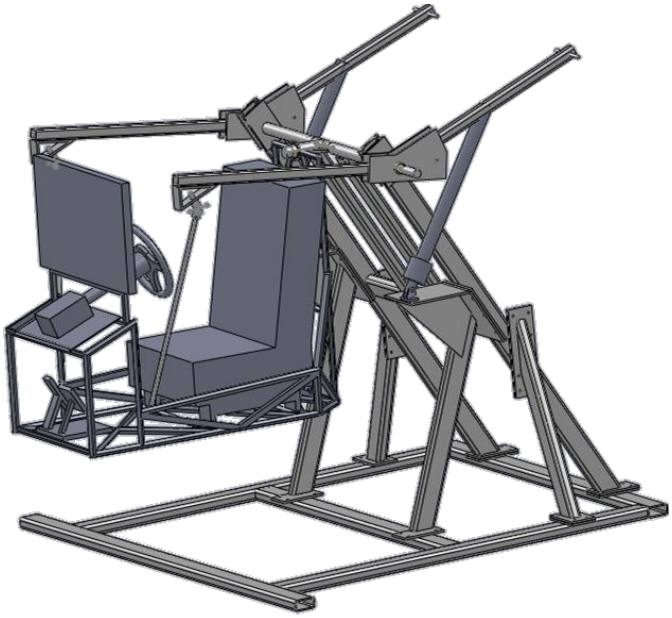
ภาพที่ 14 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1

ข้อดีของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1 คือ การกำหนดจุดหมุนให้อยู่เหนือศีรษะของผู้ขับขี่จะทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด ใช้งบประมาณน้อยในการสร้างโครงสร้างและซื้ออุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากมีโครงสร้างทุกส่วนครบถ้วนทั้งโครงสร้างและอุปกรณ์ขับเชิงเส้นครบทั้ง 2 ตัว สามารถใช้งบประมาณเพื่อซื้ออุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น เบาะนั่ง พวงมาลัย เข็มขัดนิรภัย และแป้นเหยียบ เพื่อให้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์นี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ข้อเสียของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1 คือ การออกแบบโครงสร้างหลักและโครงสร้างที่นั่งด้วยเหล็กกล่องซึ่งทำให้โครงสร้างทั้งหมดมีน้ำหนักมาก โดยโครงสร้างที่นั่งมีน้ำหนักประมาณ 70 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่มากและมีผลต่อการตอบสนองการเคลื่อนไหวมุมโรลที่ระบบจำลองได้น้อยกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ $\pm$40 องศา

3.2.2 **ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่** 2

ระบบจำลองการขับขี่รูปแบบที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 15 นี้มีกลไกควบคุมการเอียงมุมพิทช์และมุมโรลเช่นเดียวกับระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 1 แต่เปลี่ยนอุปกรณ์ขับเชิงเส้นให้มีช่วงชัก 600 มิลลิเมตร จากการทดลองคำนวณมุมเอียงโดยประมาณพบว่ามี ขนาดมุมพิทช์ลงเท่ากับ 35 องศา มุมพิทช์ขึ้น 42 องศา และมีมุมโรลเท่ากับ $\pm$39 องศา



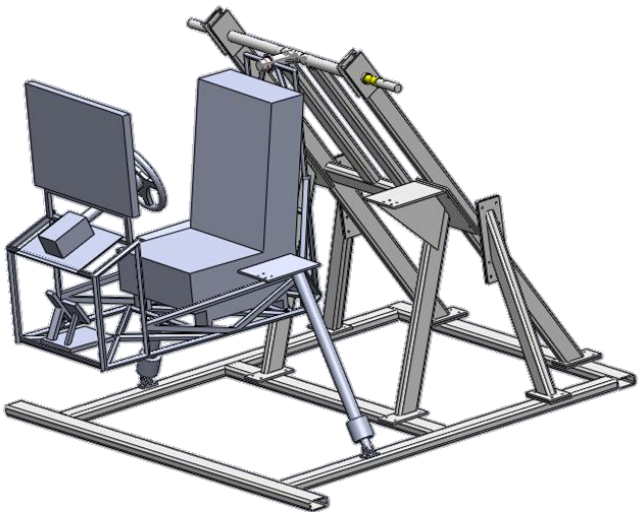
ภาพที่ 15 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2

ข้อดีของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2 คือ การกำหนดจุดหมุนให้อยู่เหนือศีรษะของผู้ขับขี่จะทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด การออกแบบโครงสร้างที่นั่งใหม่ให้เป็นโครงสร้างแบบสเปสเฟรมช่วยให้น้ำหนักโครงสร้างที่นั่งลดลง ซึ่งน้ำหนักที่ลดลงนี้ส่งผลต่อการรับภาระที่ลดลงของชิ้นส่วนและกลไกต่างๆ ที่ใช้ค วบคุมการเคลื่อนไหวของโครงสร้างที่นั่ง รวมทั้งช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการเคลื่อนไหวของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ให้มากขึ้นอีกด้วย

ข้อเสียของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2 คือ การเปลี่ยนสร้างโครงสร้างที่นั่งและเปลี่ยนอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นให้มีช่วงชักมากขึ้น ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเพื่อสร้างโครงสร้างใหม่และซื้ออุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นใหม่ รวมทั้งอาจต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลักให้เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวใหม่ การติดตั้งกลไกควบคุมการเคลื่อนไหวลักษณะนี้จะเกิดความไม่สะดวกในการเข้า-ออกของผู้ขับขี่ นอกจากนี้ขนาดของมุมโรลยังน้อยกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ สามารถเอียงมุมโรลได้โดยประมาณ $\pm$39 องศาซึ่งมากกว่ามุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์แบบที่ 1

3.2.3 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3

ระบบจำลองการขับขี่รูปแบบที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 16 นี้ติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นที่มีช่วงชัก 600 มิลลิเมตรไว้ระหว่างโครงสร้างหลักกับโครงสร้างที่นั่งเพื่อใช้ควบคุมการเอียงมุมพิทช์และมุมโรลโดยตรง จากการทดลองคำนวณมุมเอียงโดยประมาณพบว่ามีขนาดมุมพิทช์ลงเท่ากับ 10 องศา และมีมุมโรลเท่ากับ $\pm$20 องศา และจากการทดลองจำลองการเคลื่อนไหวกลไกของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3 นี้พบว่ายังมีปัญหาเกี่ยวกับกลไกการเคลื่อนไหวอยู่ซึ่งส่งผลต่อการสร้างระบบควบคุมการเคลื่อนไหวด้วย



ภาพที่ 16 ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3

ข้อดีของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3 คือ การกำหนดจุดหมุนให้อยู่เหนือศีรษะของผู้ขับขี่จะทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด การออกแบบโครงสร้างที่นั่งใหม่ให้เป็นโครงสร้างแบบสเปสเฟรมช่วยให้น้ำหนักโครงสร้างที่นั่งลดลง ซึ่งน้ำหนักที่ลดลงนี้ส่งผลต่อการรับภาระที่ลดลงของชิ้นส่วนและกลไกต่างๆ ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวของโครงสร้างที่นั่ง รวมทั้งช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการเคลื่อนไหวของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ให้มากขึ้นอีกด้วย การติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นเข้าที่โครงสร้างที่นั่งโดยตรงช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมการเอียงมุมพิทช์และมุมโรลได้ดีกว่าระบบจำลองรูปแบบที่ 1 และ 2 นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นรูปแบบนี้ยังสะดวกในการเข้า-ออกเพื่อทดสอบของผู้ขับขี่อีกด้วย

ข้อเสียของการใช้ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 3 คือ การเปลี่ยนสร้างโครงสร้างที่นั่งและเปลี่ยนอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นให้มีช่วงชักมากขึ้น ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเพื่อสร้างโครงสร้างใหม่และซื้ออุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นใหม่ รวมทั้งอาจต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลักให้เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวใหม่ ขนาดของมุมพิทช์และมุมโรลยังน้อยกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้อยู่มากและยังมีปัญหาเกี่ยวกับกลไกการเคลื่อนไหวร่วมด้วย

3.3 การวิเคราะห์และเลือกระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสม

การเลือกระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมที่สุดจากการเสนอรูปแบบของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ทั้ง 3 รูปแบบซึ่งมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันต้องมีการกำหนดเกณฑ์การพิจารณาและวิธีการวิเคราะห์และตัดสินใจที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 เกณฑ์การพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ

การวิเคราะห์จุดเด่นแต่ละรูปแบบเพื่อเลือกระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการศึกษาผลของการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เกิดจากการโคลงของรถยนต์ ต้องกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาด้านต่างๆ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการ เปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ โดยการกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาได้ใช้ขอบเขตที่กล่าวไว้ข้างต้นกำหนดเป็นเกณฑ์ไว้ด้วย

3.3.1.1 พิจารณาช่วงของมุมพิทช์และมุมโรล

พิจารณาขนาดมุมพิทช์และมุมโรลที่ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์แต่ละรูปแบบสามารถจำลองได้ โดยเปรียบเทียบกับขนาดมุมพิทช์และมุมโรลที่กำหนดไว้ในขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ คือ ขนาดของมุมพิทช์ $\pm$25 องศาและมุมโรล $\pm$40 องศา ซึ่งระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมต้องสามารถจำลองขนาดมุมพิทช์และมุมโรลใกล้เคียงช่วงที่กำหนดมากที่สุด

3.3.1.2 พิจารณาน้ำหนักโครงสร้างที่นั่ง

น้ำหนักโครงสร้างที่นั่งเป็นสิ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนไหวของกลไกต่างๆ ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมควรควรมีน้ำหนักโครงสร้างซึ่งกำหนดไว้ในขอบเขตของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ คือ น้ำหนักประมาณ 35 กิโลกรัม

3.3.1.3 พิจารณาการจัดสรรงบประมาณ

เนื่องจากงบประมาณในการทำโครงงานนี้มีจำกัด การพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของค่าใช้จ่ายกับประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของระบบจำลอง ซึ่ง

ความเหมาะสมในการจัดสรรงบประมาณพิจารณาจากการพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ได้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยมีค่าใช้จ่ายต่างๆ อยู่ในงบประมาณที่จำกัด

3.3.1.4 พิจารณาความสะดวกในการใช้งาน

การพิจารณาความสะดวกเน้นที่ความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ขับขี่ เช่น ความสะดวกในการเข้า-ออกในการใช้งาน ช่วงน้ำหนักของผู้ขับขี่ที่สามารถใช้งานได้ไม่จำกัดมากเกินไป ความกว้างของขนาดที่นั่งมีความเหมาะสม ฯลฯ ซึ่งการออกแบบกลไกต่างๆ ต้องคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานด้วย

3.3.1.5 พิจารณาการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ที่มีอยู่

เนื่องจากระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์นี้มีโครงสร้างและอุปกรณ์บางส่วนที่สร้างไว้แล้ว เช่น โครงสร้างที่นั่ง ระบบควบคุมการเลี้ยว ฯลฯ ดังนั้นการพัฒนาระบบจำลองควรนำสิ่งที่มีอยู่มาประยุกต์ให้เหมาะสมกับความต้องการในการใช้งานให้ได้มากที่สุด

3.3.2 **วิธีการวิเคราะห์และตัดสินใจ**

เนื่องจากความสำคัญของหัวข้อที่พิจารณานั้นต่างกัน การวิเคราะห์และตัดสินใจเลือกระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เหมาะสมจึงใช้วิธีการให้คะแนนแบบถ่วงน้ำหนัก โดยกำหนดให้น้ำหนักตัวคูณมากกับหัวข้อที่มีความสำคัญมากสำหรับระบบจำลองและให้น้ำหนักตัวคูณลดลงตามลำดับความสำคัญที่ลดลงมา ส่วนการให้คะแนนแบ่งความละเอียดเป็น 3 ระดับ คือ ดี ให้คะแนนเท่ากับ 3 คะแนน ปานกลาง ให้คะแนนเท่ากับ 2 คะแนน และไม่ดี ให้คะแนนเท่ากับศูนย์คะแนน

การกำหนดน้ำหนักตัวคูณให้ความสำคัญกับมุมพิทช์และมุมโรลที่จำลองได้มากที่สุดจึงให้น้ำหนักตัวคูณเท่ากับ 4 โดยน้ำหนักของโครงสร้างที่นั่งและการจัดสรรงบประมาณมีความสำคัญรองลงมาจึงให้น้ำหนักตัวคูณเท่ากับ 3 ส่วนความสะดวกในการใช้งานให้น้ำหนักตัวคูณเท่ากับ 2 และการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ที่มีอยู่มีความสำคัญน้อยที่สุดจึงให้น้ำหนักตัวคูณเท่ากับ1

3.3.3 **สรุปผลแบบจำลองที่เหมาะสม**

เมื่อกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมและวิธีการวิเคราะห์และตัดสินใจแล้ว จึงให้คะแนนระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การให้คะแนนแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อพิจารณาความเหมาะสมด้านต่างๆ

หัวข้อที่พิจารณา	**น้ำหนัก ตัวคูณ**	**ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์**		
		รูปแบบที่ 1	**รูปแบบที่ 2**	**รูปแบบที่ 3**
มุมพิทช์และมุมโรล	4	1	3	2
น้ำหนักของโครงสร้างที่นั่ง	3	1	3	3
การจัดสรรงบประมาณ	3	3	2	2
ความสะดวกในการใช้งาน	2	2	2	3
การใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ที่มีอยู่	1	3	2	1
รวมคะแนน		23	33	30

เมื่อพิจารณาคะแนนรวมที่สูงสุดจากตารางที่ 3 พบว่ารูปแบบที่ 2 มีความเหมาะสมสำหรับนำไปสร้างระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์มากที่สุด โดยมีความสามารถจำลองมุมพิทช์และมุมโรลในช่วงที่เหมาะสมที่สุด และน้ำหนักของโครงสร้างที่นั่งมีความเหมาะสมในระดับดี ส่วนการจัดสรรงบประมาณ ความสะดวกในการใช้งาน และการใช้ประโยช์จากอุปกรณ์ที่มีอยู่มีความเหมาะสมในระดับปานกลาง

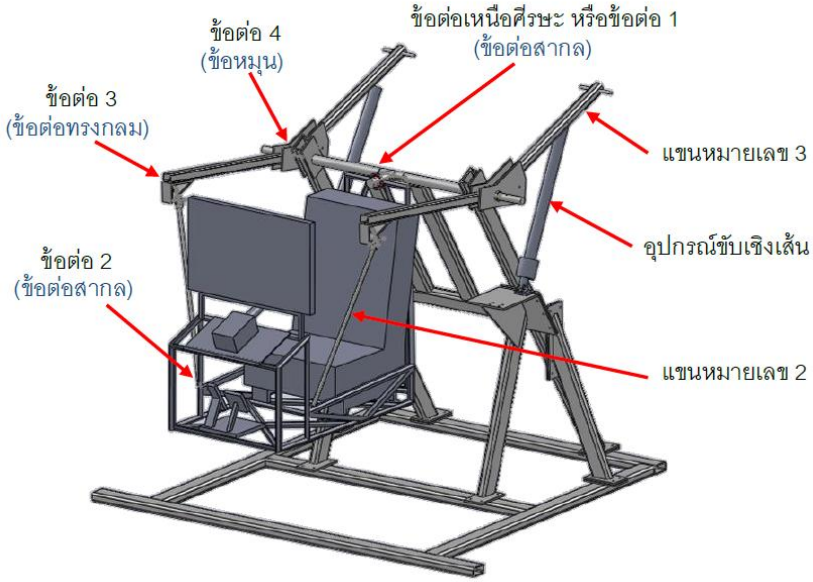
3.4 **การคำนวณและวิเคราะห์โครงสร้างกลไกของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์**

เมื่อออกแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เบื้องต้นและพิจารณาเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จึงสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณจำนวนองศาอิสระ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ ตำแหน่งติดอุปกรณ์ขับเคลื่อน และความยาวของแขนเชื่อมต่อ (Linkage) ที่เหมาะสม โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดเชื่อมต่อต่างๆ

และใช้โปรแกรมไมโครซอฟ เอ็กซ์เซลล์ (Microsoft Excel) ช่วยในการคำนวณ จากนั้นวิเคราะห์การทำงานของกลไกโดยนำตำแหน่งจุดเชื่อมต่อจากการคำนวณไปใช้ในการจำลองการเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรมแมทแลป ซิมแมคคานิกส์ (MATLAB SimMechanics) เพื่อจำลองการเคลื่อนไหวของกลไก รวมทั้งหาขนาดมุมพิทช์และมุมโรลที่ระบบสามารถจำลองได้ นอกจากนี้ยังแสดงการคำนวณแรงที่กระทำบนกลไกต่างๆ ของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ด้วย

3.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องพิจารณาโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์รูปแบบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ และแขนกลไกดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 จุดเชื่อมต่อและแขนต่างๆ บนระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดเชื่อมต่อต่างๆ โดยกำหนดขนาดมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เพื่อหาตำแหน่งของข้อต่อ ความยาวของแขนกลไก และความยาวของอุปกรณ์ขับเชิงเส้นขณะเกิดการเอียงมุมพิทช์และมุมโรลที่กำหนด เพื่อนำมาวิเคราะห์หาตำ แหน่งข้อต่อ ขนาดแขนกลไก และขนาดอุปกรณ์ขับ เชิงเส้นที่เหมาะสม รวมทั้งพิจารณาความเป็นไปได้ของตำแหน่งกลไก

สำหรับระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ นอกจากนี้สมการทางคณิตศาสตร์ยังใช้อธิบายแรงที่กระทำบนกลไกต่างๆ เพื่อประกอบการวิเคราะห์ภาระของกลไกและอุปกรณ์ขับเชิงเส้นด้วย

3.4.1.1 การคำนวณจำนวนองศาอิสระของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

การเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ส่วนประกอบแต่ละชิ้นสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน x, y และ z และสามารถหมุนรอบแนวแกน x, y และ z รวมเป็น 6 ทิศทาง ดังนั้นเมื่อระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์มีชิ้นส่วนทั้งหมด n ชิ้นโดยกำหนดให้ชิ้นส่วนหนึ่งเป็นตัวอ้างอิงคือให้อยู่นิ่ง จะสามารถคำนวณจำนวนองศาอิสระของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ได้ตามสมการที่ 3

$$DOF = 6(n-1) - \sum m_i r_i \qquad (3)$$

การต่อเชื่อมต่อชิ้นส่วนแต่ละชิ้นด้วยข้อต่อลักษณะต่างๆ ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนถูกจำกัดจึงมีจำนวนองศาอิสระที่ลดลง โดยจำนวนองศาอิสระที่ลดลงขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของข้อต่อดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนทิศทางการเคลื่อนที่ที่ถูกจำกัดของข้อต่อชนิดต่างๆ

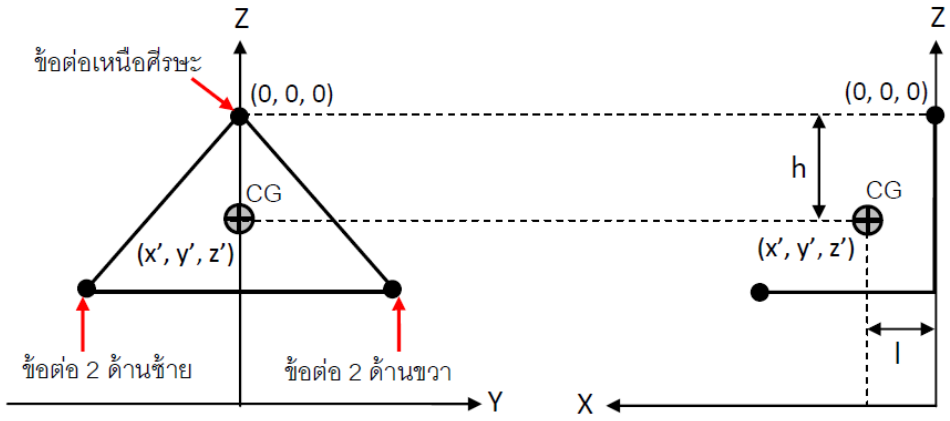
ชนิดข้อต่อ	จำนวนทิศทางการเคลื่อนที่ที่ถูกจำกัด
ข้อต่อหมุน (Revolute Joint)	5
ข้อต่อสากล (Universal Joint)	4
ข้อต่อทรงกลม (Spherical Joint)	3

ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ประกอบด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 6 ชิ้น (n=6) ได้แก่ โครงสร้างหลัก โครงสร้างที่นั่ง แขนหมายเลข 2 จำนวน 2 ชิ้น และแขนหมายเลข 3 จำนวน 2 ชิ้น มีข้อต่อทั้งหมด 7 ตำแหน่ง ประกอบด้วย ข้อต่อหมุน 2 ตำแหน่ง ($m_1 = 2, r_1 = 5$) ข้อต่อสากล 3 ตำแหน่ง ($m_2 = 3, r_2 = 4$) และข้อต่อทรงกลม 2 ตำแหน่ง ($m_3 = 2, r_3 = 3$) เมื่อคำนวณจำนวนองศาอิสระตามสมการที่ 3 จะได้ว่าระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 2

3.4.1.2 การคำนวณตำแหน่งต่างๆ ของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

3.4.1.2.1 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (Center of Gravity, CG) ของโครงสร้างที่นั่ง

ขณะเริ่มต้นซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ในมุมพิทช์และมุมโรล ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างที่นั่งอยู่ใต้ข้อต่อเหนือศีรษะลงมาตามแนวแกน Z เป็นระยะ h และเคลื่อนไปตามแนวแกน X เป็นระยะ l ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างที่นั่งขณะไม่มีการเคลื่อนที่มุมพิทช์และมุมโรล

เมื่อมีการเคลื่อนที่ในมุมพิทช์และมุมโรลจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างจะเปลี่ยนไป โดยสามารถคำนวณตำแหน่งใหม่ของจุดศูนย์กลางมวลซึ่งเทียบกับตำแหน่งข้อต่อเหนือศีรษะในแกน X, Y และ Z ได้จากสมการที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

$$x' = h\cos\theta\sin\phi + l\cos\phi \tag{4}$$

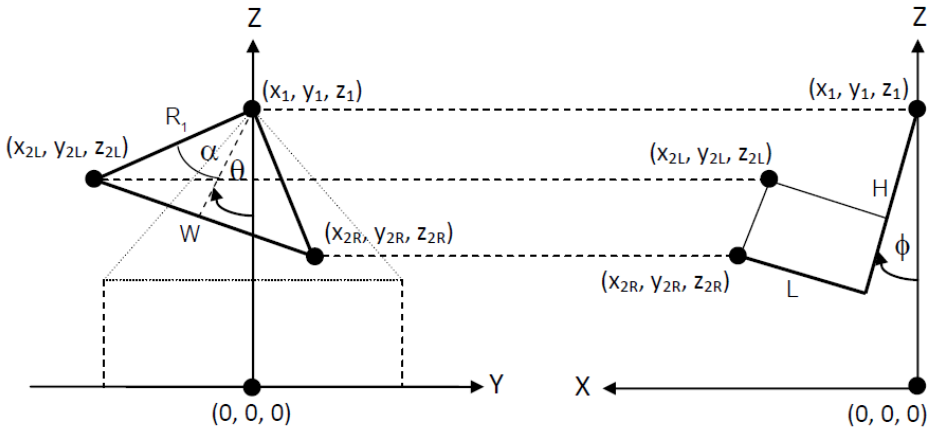
$$y' = -h\sin\theta \tag{5}$$

$$z' = -h\cos\theta\cos\phi + l\sin\phi \tag{6}$$

3.4.1.2.2 ตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

พิจารณาตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างที่นั่งทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ข้อต่อเหนือศีรษะแทนด้วยพิกัด (x_1, y_1, z_1) ข้อต่อ 2 ด้านซ้าย แทนด้วยพิกัด (x_{2L}, y_{2L}, z_{2L}) และข้อต่อ 2 ด้านขวา

แทนด้วยพิกัด (x_{2R}, y_{2R}, z_{2R}) โดยพิกัดทั้งหมดอ้างอิงเทียบกับจุดกำเนิด (0, 0, 0) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 พิกัดของตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างที่นั่ง

เมื่อระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เอียงมุมพิทช์ (ϕ) และมุมโรล (θ) ตำแหน่งข้อต่อบนโครงสร้างที่นั่งจะเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถคำนวณตำแหน่งข้อต่อใหม่ในแกน X, Y และ Z ได้ดังนี้

ตำแหน่งข้อต่อ 2 ด้านซ้าย แทนด้วยพิกัด (x_{2L}, y_{2L}, z_{2L}) สามารถคำนวณจากสมการที่ 7, 8 และ 9

$$x_{2L} = R_1 \cos(\alpha + \theta)\sin\phi + L\cos\phi \tag{7}$$

$$y_{2L} = -R_1 \sin(\alpha + \theta) \tag{8}$$

$$z_{2L} = z_{1L} - \left[R_1 \cos(\alpha + \theta)\cos\phi - L\sin\phi\right] \tag{9}$$

ส่วนด้านขวา แทนด้วยพิกัด (x_{2R}, y_{2R}, z_{2R}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10, 11 และ 12

$$x_{2R} = R_1 \cos(-\alpha + \theta)\sin\phi + L\cos\phi \tag{10}$$

$$y_{2R} = R_1 \sin(-\alpha + \theta) \tag{11}$$

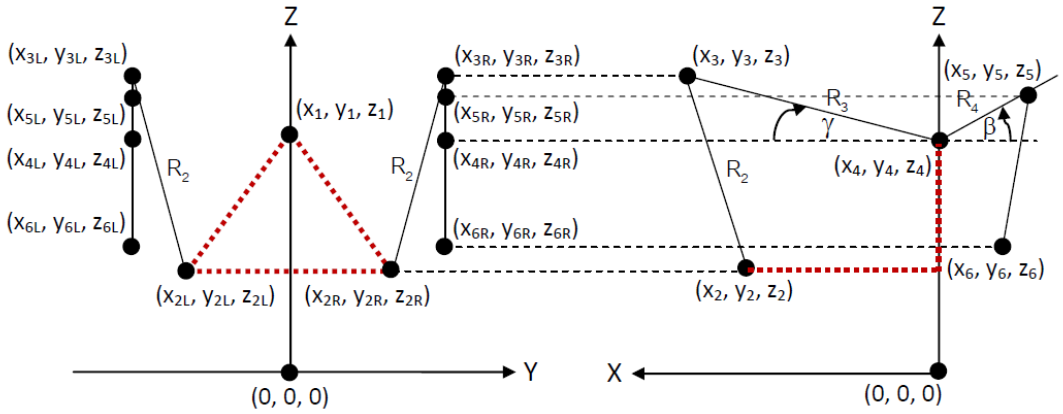
$$z_{2R} = z_{1R} - \left[R_1 \cos(-\alpha + \theta)\cos\phi - L\sin\phi\right] \tag{12}$$

โดย α และ R_1 สามารถหาค่าจากสมการที่ 13 และ 14

$$\alpha = \arctan\left(\frac{W}{2H}\right) \tag{13}$$

$$R_1 = \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + (H)^2} \tag{14}$$

พิจารณาตำแหน่งข้อต่อบนแขนหมายเลข 3 ประกอบด้วย ข้อต่อ 3 แทนด้วยพิกัด (x_3, y_3, z_3) และข้อต่อยึดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้น แทนด้วยพิกัด (x_5, y_5, z_5) โดยมีข้อต่อ 4 แทนด้วยพิกัด (x_4, y_4, z_4) เป็นจุดหมุนของแขนหมายเลข 3 โดยพิกัดทั้งหมดนี้อ้างอิงเทียบกับจุดกำเนิด (0, 0, 0) ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ตำแหน่งข้อต่อบนแขนหมายเลข 3

เมื่อระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เอียงมุมพิทช์ (ϕ) และมุมโรล (θ) ตำแหน่งข้อต่อบนแขนหมายเลข 3 จะเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถคำนวณตำแหน่งข้อต่อใหม่ในแกน X, Y และ Z ได้ดังนี้ ตำแหน่งข้อต่อ 3 ด้านซ้าย แทนด้วยพิกัด (x_{3L}, y_{3L}, z_{3L}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15, 16 และ 17

$$x_{3L} = x_{4L} + R_3 \cos\gamma_L \tag{15}$$

$$y_{3L} = y_{4L} \tag{16}$$

$$z_{3L} = z_{4L} + R_3 \sin\gamma_L \tag{17}$$

โดย γ_L สามารถหาค่าจากสมการที่ 18, 19, 20 และ 21

$$\gamma_L = -\arcsin\left(\frac{A_L}{B_L}\right) - C_L \tag{18}$$

$$A_L = \left(x_{2L} - x_{4L}\right)^2 + \left(y_{2L} - y_{4L}\right)^2 + \left(z_{2L} - z_{4L}\right)^2 + \left(R_3^{\,2} - R_2^{\,2}\right) \tag{19}$$

$$B_L = 2R_3\sqrt{\left(x_{2L} - x_{4L}\right)^2 + \left(z_{2L} - z_{4L}\right)^2} \tag{20}$$

$$C_L = \arctan\left(\frac{x_{2L} - x_{4L}}{z_{2L} - z_{4L}}\right) \tag{21}$$

ส่วน R_2 และ R_3 สามารถหาได้จากสมการที่ 22 และ 23

$$R_2 = \sqrt{\left(x_2 - x_3\right)^2 + \left(y_2 - y_3\right)^2 + \left(z_2 - z_3\right)^2} \tag{22}$$

$$R_3 = \sqrt{\left(x_3 - x_4\right)^2 + \left(y_3 - y_4\right)^2 + \left(z_3 - z_4\right)^2} \tag{23}$$

ตำแหน่งข้อต่อ 3 ด้านขวา แทนด้วยพิกัด (x_{3R}, y_{3R}, z_{3R}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24, 25 และ 26

$$x_{3R} = x_{4R} + R_3\cos\gamma_R \tag{24}$$

$$y_{3R} = y_{4R} \tag{25}$$

$$z_{3R} = z_{4R} + R_3\sin\gamma_R \tag{26}$$

โดย γ_R สามารถหาค่าจากสมการที่ 27, 28, 29 และ 30

$$\gamma_R = -\arcsin\left(\frac{A_R}{B_R}\right) - C_R \tag{27}$$

$$A_R = \left(x_{2R} - x_{4R}\right)^2 + \left(y_{2R} - y_{4R}\right)^2 + \left(z_{2R} - z_{4R}\right)^2 + \left(R_3^{\,2} - R_2^{\,2}\right) \tag{28}$$

$$B_R = 2R_3\sqrt{\left(x_{2R} - x_{4R}\right)^2 + \left(z_{2R} - z_{4R}\right)^2} \tag{29}$$

$$C_R = \arctan\left(\frac{x_{2R} - x_{4R}}{z_{2R} - z_{4R}}\right) \tag{30}$$

ส่วน R_2 และ R_3 สามารถหาได้จากสมการที่ 22 และ 23 เช่นเดียวกับด้านซ้าย

ตำแหน่งข้อต่อยึดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นด้านซ้าย แทนด้วยพิกัด (x_{5L}, y_{5L}, z_{5L}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31, 32 และ 33

$$x_{5L} = x_{4L} - R_4 \cos\beta_L \tag{31}$$

$$y_{5L} = y_{4L} \tag{32}$$

$$z_{5L} = z_{4L} + R_4 \sin\beta_L \tag{33}$$

โดย β_L สามารถคำนวณจากสมการที่ 34

$$\beta_L = 180 - 152.53 - \gamma_L \tag{34}$$

ตำแหน่งข้อต่อยึดอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นด้านขวา แทนด้วยพิกัด (x_{5R}, y_{5R}, z_{5R}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 35, 36 และ 37

$$x_{5R} = x_{4R} - R_4 \cos\beta_R \tag{35}$$

$$y_{5R} = y_{4R} \tag{36}$$

$$z_{5R} = z_{4R} + R_4 \sin\beta_R \tag{37}$$

โดย β_R สามารถคำนวณจากสมการที่ 38

$$\beta_R = 180 - 152.53 - \gamma_R \tag{38}$$

จากการคำนวณตำแหน่งข้อต่อขณะระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เอียงมุมพิทช์ (ϕ) และมุมโรล (θ) สามารถคำนวณความยาวของอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้านซ้ายและด้านขวาจากสมการที่ 39 และ 40

$$(\text{Actuator Length})_L = \sqrt{(x_{5L} - x_{6L})^2 + (z_{5L} - z_{6L})^2} \quad (39)$$

$$(\text{Actuator Length})_R = \sqrt{(x_{5R} - x_{6R})^2 + (z_{5R} - z_{6R})^2} \quad (40)$$

3.4.1.3 การคำนวณแรงกระทำบนกลไกต่างๆ ของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

เนื่องจากแรงเป็นบริมาณเวกเตอร์ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง การกำหนดทิศทางของแรงจะใช้เวกเตอร์หนึ่งหน่วย โดยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแกน X, Y และ Z คำนวณจากสมการที่ 41, 42 และ 43 ตามลำดับ

$$\hat{x}_{ij} = \frac{(x_j - x_i)}{R_{ij}}\hat{i} \quad (41)$$

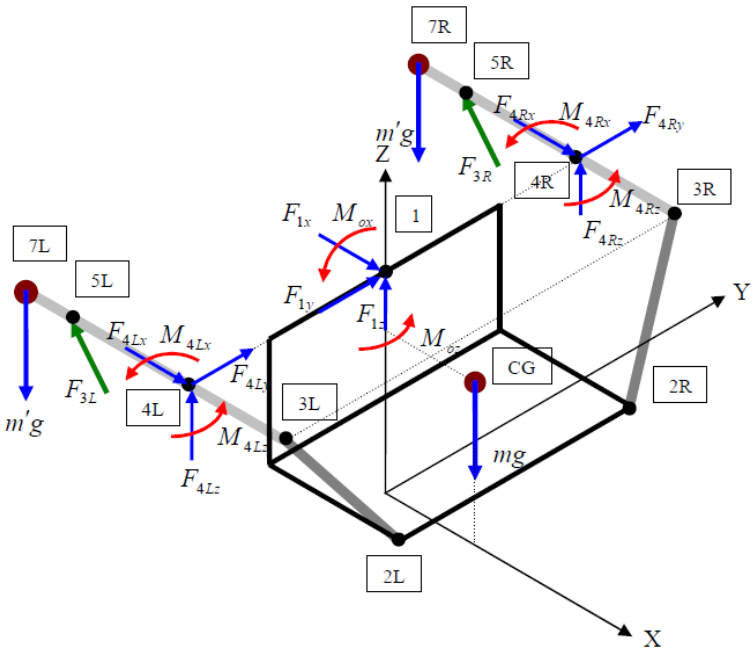
$$\hat{y}_{ij} = \frac{(y_j - y_i)}{R_{ij}}\hat{j} \quad (42)$$

$$\hat{z}_{ij} = \frac{(z_j - z_i)}{R_{ij}}\hat{k} \quad (43)$$

โดย R_{ij} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 44

$$R_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (44)$$

ในการคำนวณการเคลื่อนที่ด้วยวิธีทางพลศาสตร์ (Dynamics) จะมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นการใช้วิธีทางสถิตยศาสตร์ (Statics) จึงช่วยให้ง่ายต่อการคำนวณมากขึ้น โดยมีการเพิ่มตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) เพื่อป้องกันการเกิดแรงจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (20) การสร้างสมการในภาวะสมดุลจะพิจารณาฟรีบอดี้ไดอะแกรม (Free Body Diagram) ซึ่งแสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 Free Body Diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างขณะอยู่ในภาวะสมดุล

จากการคำนวณสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนต่างๆของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ซึ่งแสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก สามารถหาแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนกลไกต่างๆ และแรงจากอุปกรณ์ขับเชิงเส้นได้จากสมการดังต่อไปนี้

แรงที่กระทำบนแขนหมายเลข 3 ด้านซ้ายและขวาซึ่งแทนด้วย F_{2L} และ F_{2R} ตามลำดับ และโมเมนต์บนข้อต่อเหนือศีรษะซึ่งแทนด้วย M_O สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 45, 46 และ 47

$$F_{2L} = \frac{E\left[N + M_o \sin\phi + \frac{JI}{E}\right]}{KE - GJ} \tag{45}$$

$$F_{2R} = \frac{-(I + GF_{2L})}{E} \tag{46}$$

$$M_o = \frac{S - RQ}{R\sin\phi + \cos\phi} \tag{47}$$

โดยตัวแปรต่างคำนวณจากสมการที่ 48 ถึง 58 ดังนี้

$$E = -x_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right| + z_{2R}\left|\hat{x}_{23R}\right| - z_1\left|\hat{x}_{23R}\right| \tag{48}$$

$$G = -x_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right| + z_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right| - z_1\left|\hat{x}_{23L}\right| \tag{49}$$

$$I = mg(x'_{CG}) \tag{50}$$

$$J = y_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right| - z_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right| + z_1\left|\hat{y}_{23R}\right| \tag{51}$$

$$K = y_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right| - z_{2L}\left|\hat{y}_{23L}\right| + z_1\left|\hat{y}_{23L}\right| \tag{52}$$

$$N = mg(y'_{CG}) \tag{53}$$

$$O = x_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right| - y_{2R}\left|\hat{x}_{23R}\right| \tag{54}$$

$$P = x_{2L}\left|\hat{y}_{23L}\right| - y_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right| \tag{55}$$

$$Q = N + \frac{IJ}{E} \tag{56}$$

$$R = \frac{PE - OG}{KE - JG} \tag{57}$$

$$S = \frac{OI}{E} \tag{58}$$

แรงที่อุปกรณ์ขับด้านซ้ายและขวาแทนด้วย F_{3L} และ F_{3R} สามารถคำนวณจากสมการที่ 59 และ 60

$$F_{3L} = \frac{m'g\left(x_{7L} - x_{4L}\right) + F_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right|\left(x_{3L} - x_{4L}\right) - F_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right|\left(z_{3L} - z_{4L}\right)}{\left|\hat{z}_{65L}\right|\left(x_{4L} - x_{5L}\right) - \left|\hat{x}_{65L}\right|\left(z_{4L} - z_{5L}\right)} \tag{59}$$

$$F_{3R} = \frac{m'g\left(x_{7R} - x_{4R}\right) + F_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right|\left(x_{3R} - x_{4R}\right) - F_{2R}\left|\hat{x}_{23R}\right|\left(z_{3R} - z_{4R}\right)}{\left|\hat{z}_{65R}\right|\left(x_{4R} - x_{5R}\right) - \left|\hat{x}_{65R}\right|\left(z_{4R} - z_{5R}\right)} \tag{60}$$

แรงและโมเมนต์ที่กระทำบริเวณจุดหมุนของแขนหมายเลข 3 ด้านซ้ายซึ่งแทนด้วย F_{4L} และ M_{4L} สามารถคำนวณจากสมการที่ 61 ถึง 65 และด้านขวาซึ่งแทนด้วย F_{4R} และ M_{4R} สามารถคำนวณจากสมการที่ 66 ถึง 70

$$F_{4xL} = F_{2xL} - F_{3xL} \tag{61}$$

$$F_{4yL} = F_{2yL} \tag{62}$$

$$F_{4zL} = F_{2zL} - F_{3zL} + mg \tag{63}$$

$$M_{4xL} = -F_{2yL}\left(z_{3L} - z_{4L}\right) \quad (64)$$

$$M_{4zL} = F_{2yL}\left(x_{3L} - x_{4L}\right) \quad (65)$$

$$F_{4xR} = F_{2xR} - F_{3xR} \quad (66)$$

$$F_{4yR} = F_{2yR} \quad (67)$$

$$F_{4zR} = F_{2zR} - F_{3zR} + mg \quad (68)$$

$$M_{4xR} = -F_{2yR}\left(z_{3R} - z_{4R}\right) \quad (69)$$

$$M_{4zR} = F_{2yR}\left(x_{3R} - x_{4R}\right) \quad (70)$$

แรงและโมเมนต์ที่กระทำบริเวณจุดหมุนเหนือศีรษะ F_1 และ M_1 สามารถคำนวณจากสมการที่ 71 ถึง 75

$$F_{1x} = -\left(F_{2xL} + F_{2xR}\right) \quad (71)$$

$$F_{1y} = -\left(F_{2yL} + F_{2yR}\right) \quad (72)$$

$$F_{1z} = mg - \left(F_{2zL} + F_{2zR}\right) \quad (73)$$

$$M_{1x} = M_o \sin\phi \quad (74)$$

$$M_{1z} = M_o \cos\phi \quad (75)$$

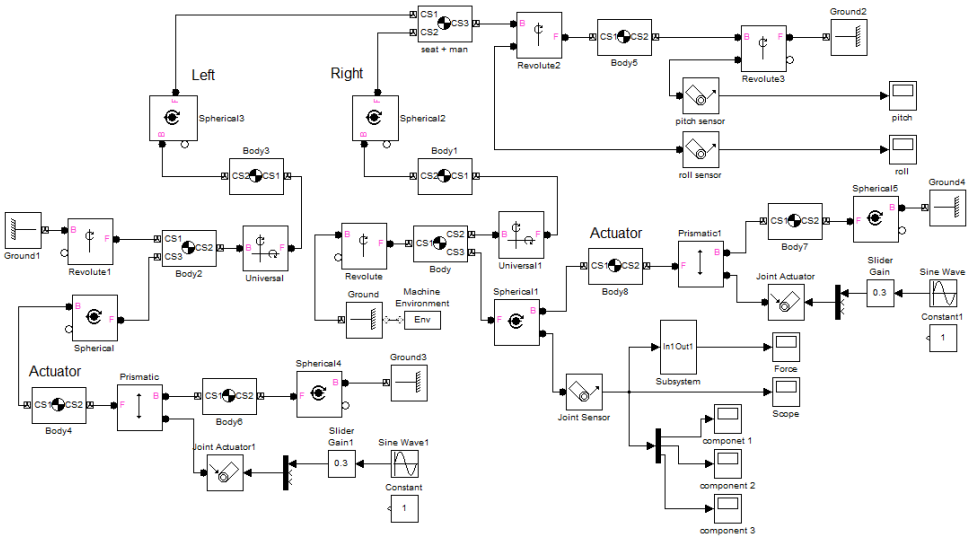
การแสดงผลการคำนวณตำแหน่งข้อต่อ ความยาวของแขนกลไก ความยาวของอุปกรณ์ขับเชิงเส้น และแรงกระทำบนกลไกต่างๆ ด้วยสมการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงในบทถัดไป

3.4.2 **แบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว** (Simulation Model)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้การกำหนดมุมพิทช์และมุมโรลในการคำนวณตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ ความยาวของแขนกลไก (Linkage) และความยาวของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นที่เหมาะสม แต่ในการสร้างแบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหวจะใช้กระบวนการย้อนกลับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดตำแหน่งข้อต่อ ความยาวของแขนกลไก และความยาว

ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้น เพื่อจำลองกลไกการเคลื่อนไหว และวัดขนาดมุมพิทช์และมุมโรลที่ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์สามารถสร้างได้

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าช่วยให้การทดสอบการทำงานของกลไกนั้นง่ายและใช้เวลาน้อย ต่างจากเดิมที่ต้องสร้างแบบจำลองจริงเพื่อใช้ทดสอบการเคลื่อนไหวของโครงสร้าง การสร้างแบบจำลองและทดสอบกลไกการเคลื่อนไหวของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ในโครงงานนี้จะใช้โปรแกรมแมทแลป ซิมแมคคานิกส์ (MATLAB SimMechanics) ดังแสดงในภาพที่ 22 และมีรายละเอียดในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองการเคลื่อนไหวของโครงสร้างกลไกโดยกำหนดตำแหน่ง ประเภท และขนาดของข้อต่อและแขนกลไกต่างๆ ตามระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่ออกแบบจริง เพื่อให้ แสดงผลเป็นภาพการเคลื่อนไหวของกลไกและแสดงขนาดของมุมพิทช์และมุมโรลที่เวลาใดๆ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกลไกการเคลื่อนไหวนี้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงให้โครงสร้างมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 22 แผนภาพ SimMechanics ซึ่งใช้จำลองการเคลื่อนไหว

ในแผนภาพภาพที่ 22 กำหนดตำแหน่งข้อต่อตามพิกัดที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้คำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นเป็นรูปแบบของคลื่นรูปซายน์ (Sine Wave) เพื่อให้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นระยะรวม 600

มิลลิเมตร และ ใช้อุปกรณ์วัดขนาดของมุมในการแสดงผลของมุมพิทช์และโรลเป็นกราฟแสดงขนาดของมุมพิทช์และมุมโรลที่เวลาใดๆ

การทดสอบการเคลื่อนไหวของแบบจำลองกลไกการเคลื่อนที่ได้กำหนดรูปแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นเป็นรูปแบบของคลื่นรูปซายน์ (Sine Wave) ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ กำหนดให้อุปกรณ์ขับเชิงเส้นด้านซ้ายและด้านขวาเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกันเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ในมุมพิทช์ กำหนดให้อุปกรณ์ขับเชิงเส้นด้านซ้ายเคลื่อนที่เพียวด้านเดียวเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ในมุมโรล และกำหนดให้อุปกรณ์ขับเชิงเส้นด้านซ้ายและด้าน ขวาเคลื่อนที่ขึ้นลงสลับกันเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ในมุมพิทช์และมุมโรลพร้อมกัน

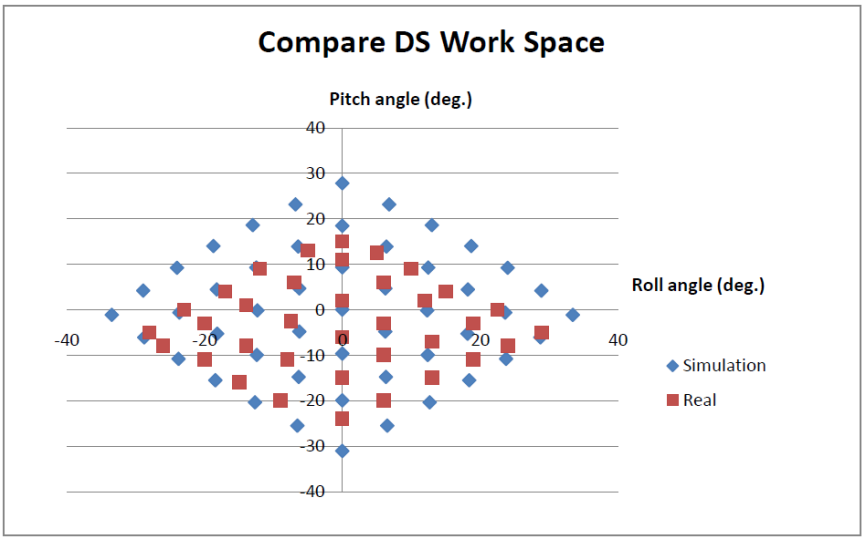
3.5 ผลการทดลองกับโครงสร้างจริง

หลังจากออกแบบและทดสอบการจำลองการเคลื่อนไหวของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์แล้วจึงนำมาปรับปรุงโครงสร้างจริงตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงใช้โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 23 ทำการทดสอบเพื่อหาช่วงการใช้งานของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

ภาพที่ 23 โครงสร้างจริงที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบโครงสร้างจริงได้ให้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นด้านหนึ่งอยู่กับที่และเลื่อนอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นอีกด้านหนึ่งให้ยืดออกครั้งละ 10 เซนติเมตรโดยเริ่มจากตำแหน่งหดสุด

ของอุปกรณ์ขับเคลื่อน ในการเลื่อนอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละครั้งก์ทำการเก็บข้อมูลมุมพิทช์และมุมโรลขณะนั้นด้วย แล้วนำมาแสดงเป็นกราฟแสดงช่วงการใช้งานของมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์นี้ ซึ่งได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 24 โดยแสดงเปรียบเทียบกับการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 24 กราฟแสดงช่วงการใช้งานมุมพิทช์และมุมโรลของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

จากภาพที่ 24 จะเห็นว่าช่วงการใช้งานที่สามารถใช้ได้จริงนั้นแคบกว่าช่วงการใช้งานที่คำนวณจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยค่าสูงสุดของมุมพิทช์ที่สามารถทำได้จริงน้อยกว่าผลการจำลองประมาณ 20% และค่าสูงสุดของมุมโรลที่สามารถทำได้จริงน้อยกว่าผลการจำลองประมาณ 25% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้คาดว่ามาจากความยาวของแขนกลและตำแหน่งข้อต่อจริงอาจมีการคลาดเคลื่อนจากที่ใช้ในการจำลอง แต่ช่วงการทำงานที่สามารถใช้ได้จริงนี้ยังกว้างพอสำหรับการทำงานวิจัยนี้ จึงยังสามารถใช้โครงสร้างนี้ในการทดสอบต่อไปได้

บทที่ 4
ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบพลวัติ

การอธิบายถึงพฤติกรรมทางพลวัติ (Dynamic Behavior) ของระบบทางวิศวกรรมนั้นมีความสัมพันธ์กับสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ที่อยู่บนโดเมนของตัวแปรเวลา (Time Domain) แต่ในทางปฏิบัติการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตินิยมทำบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) หรือโดเมนเอส (S-Domain) เนื่องจากแบบจำลองจะกระทัดรัดและสามารถประมาณผลการตอบสนองของระบบได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมได้อีกด้วย ดังนั้นในการอธิบายพฤติกรรมทางพลวัติจึงต้องอาศัยวิธีการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่บนโดเมนของตัวแปรเวลาให้เป็นสมการบนโดเมนความถี่ที่เรียกว่า การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่เมื่อรถยนต์เกิดการโคลง ซึ่งจะอธิบายถึงพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวนี้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถยนต์ (Roll Motion) และการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ (Steering Angle) ที่จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาต่างๆ โดยในการศึกษาได้ให้สัญญาณเข้าเป็นมุมการโคลงของรถยนต์ และวัดสัญญาณออกเป็นมุมการหมุนของพวงมาลัยที่เกิดขึ้น แล้วนำข้อมูลที่ได้มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกนี้ในรูปแบบที่เรียกว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function)

4.1 ฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function)

ฟังก์ชั้นถ่ายโอน (Transfer Function) คือฟังก์ชั่นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบพลวัต (Dynamic System) โดยฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้จะเขียนอยู่ในรูปตัวแปรบน S-Domain หรือในรูปของผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) (21)

เมื่อกำหนดให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนคือ G(s) ระบบมีสัญญาณเข้าคือ U(s) และสัญญาณออกคือ Y(s) สมการฟังก์ชั่นถ่ายโอนสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 76 และแสดงเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในภาพที่ 25

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \tag{76}$$

ภาพที่ 25 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแสดงฟังก์ชั่นถ่ายโอน

4.1.1 **การแปลงลาปลาซ** (Laplace Transform)

จากที่กล่าวข้างต้นว่าพฤติกรรมของระบบสามารถจำลองโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่บนโดเมนของเวลาซึ่งบางครั้งการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวเพื่อหาผลการตอบสนองของระบบไม่สามารถทำได้อย่างสะดวกหรือตรงไปตรงมา วิธีของลาปลาซจึงเข้ามามีบทบาทในการช่วยให้การแก้สมการง่ายขึ้น และยังช่วยให้การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมสะดวกมากขึ้นอีกด้วย

วิธีผลการแปลงลาปลาสเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แปลงฟังก์ชั่นต่างๆ เช่น ฟังก์ชั่นไซนูซอยด์ ฟังก์ชั่นหนึ่งหน่วย และฟังก์ชั่นเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีตัวแปรเป็นเวลา ให้อยู่ในรูปอีกตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรเชิงซ้อนหรือตัวแปรเอส โดยคำจำกัดความของผลการแปลงลาปลาซสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 77

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-st}dt \tag{77}$$

เมื่อ L คือ เครื่องหมายการทำผลการแปลงลาปลาซ

s คือ ตัวแปรเชิงซ้อนที่มีค่าเป็นจำนวนจินตภาพ

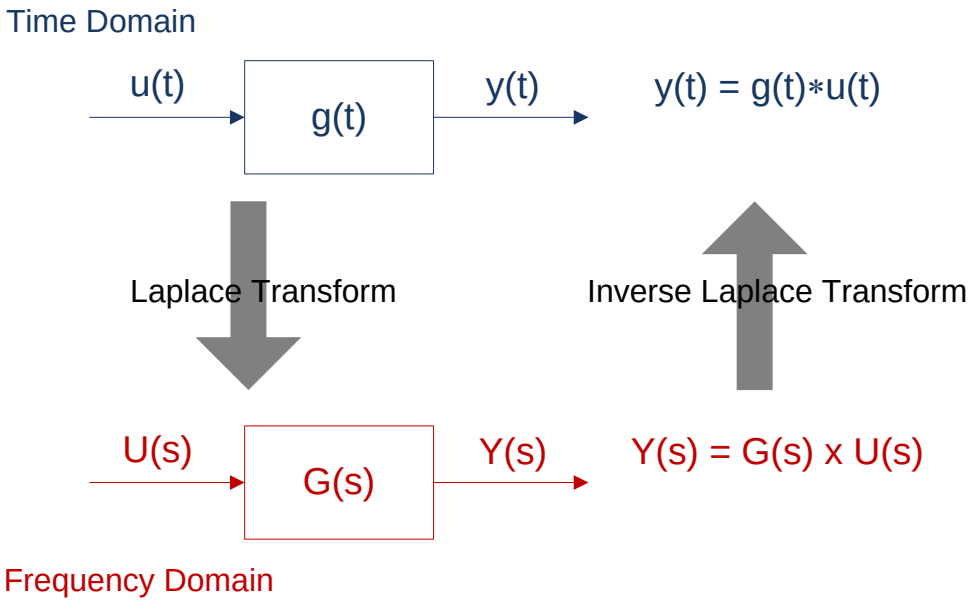
f(t) คือ ฟังก์ชั่นที่มีตัวแปรเป็นเวลา

F(s) คือ สมการของผลการแปลงลาปลาซของฟังก์ชั่น f(t)

หลังจากการแปลงผลลัพธ์ให้ไปอยู่ในโดเมนเอสแล้ว สามารถแปลงกลับมาให้เป็นฟังก์ชั่นที่อยู่ในรูปตัวแปลเวลาตามเดิมได้ด้วยการใช้วิธีผลการแปลงกลับลาปลาซ (Inverse Laplace Transform Method) โดยมีคำจำกัดความตามสมการที่ 78

$$L^{-1}\{F(s)\} = f(t) = \int_0^{\infty} F(s)e^{st}ds \qquad (78)$$

วิธีผลการแปลงลาปลาสและวิธีผลการแปลงกลับลาปลาซสามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงการแปลงฟังก์ชั่นบนโดเมนของเวลาให้อยู่บนโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงลาลาซ

จากภาพที่ 26 สัญญาณออกในโดเมนเวลาจะเป็นการสังวัตนาการ (Convolution) ระหว่าง สัญญาณขาเข้าแล ะผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) แต่เมื่อผ่านการแปลงลาลาซจะได้สัญญาณขาออกในโดเมนความถี่ที่จะอยู่ในรูปการคูณกันระหว่างผลการแปลงลาลาส

ของผลตอบสนองอิมพัลส์ จะเห็นว่าการแปลงลาลาสของสัญญาณช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายลงไปได้มาก (22)

ในการแปลงลาปลาซต้องใช้ฟังก์ชั่นของระบบพลวัติในโดเมนของเวลาก่อนจึงสามารถแปลงฟังก์ชั่นนี้ให้อยู่บนโดเมนความถี่ ดังนั้นหากไม่สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ที่เป็นฟังก์ชั่นของระบบพลวัติได้ก็ไม่สามารถหาฟังก์ชั่นซึ่งอยู่บนโดเมนความถี่สำหรับนำมาวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมได้ ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเข้าและสัญญาณออกเพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ของระบบจึงจำเป็นต้องศึกษาการแปลงฟูรีเย (Fourier Transform) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบได้

4.1.2 การแปลงฟูรีเย (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งใช้วิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก คือ การแปลงฟูรีเยแบบต่อเนื่อง (Continuous Fourier Transform) และการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) (23)

โดยทั่วไปการแปลงฟูรีเย (Fourier Transform – FT) หมายถึงการแปลงฟูรีเยแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นการเขียนฟังก์ชั่น f(t) ซึ่งอยู่บนโดเมนของเวลาให้อยู่ในรูป F(s) บนโดเมนความถี่ดังแสดงในสมการที่ 79

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi ist}dx \tag{79}$$

ส่วนการแปลงกลับของการแปลงฟูรีเย (Inverse Fourier Transform) แสดงในสมการที่ 80

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s)e^{2\pi ist}ds \tag{80}$$

การคำนวณและเก็บข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้ค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นแบบดิจิทัล คือเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ข้อมูลในทั้งโดเมนของเวลาและโดเมนความถี่ไม่ต่อเนื่อง จึงต้องอาศัยการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform – DFT) (24) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 81

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_i e^{-2\pi ijk/N} \tag{81}$$

ส่วนสมการที่ 82 แสดงการแปลงกลับของการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง

$$x_j = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-2\pi ijk/N} \tag{82}$$

เมื่อ N คือ Uniformly Sample Data Point

แต่เนื่องจากการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องต้องใช้เวลาคำนวณนานมากและเกิดความผิดพลาดสะสมในการคำนวณมากด้วย จึงมีผู้คิดเทคนิคหลายแบบที่ช่วยให้คำนวณได้เ ร็วขึ้นและมีความผิดพลาดสะสมลดลง ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การแปลงฟูรีเยแบบเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT)

เนื่องด้วยการแปลงฟูรีเยแบบเร็วได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้มีการเขียนโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับโปรแกรมต่างๆมากมายและบางโปรแกรมยังมีฟังก์ชั่นสำเร็จรูปสำหรับแปลงฟูรีเยแบบเร็วอีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้งานฟังก์ชั่นสำเร็จรูปของโปรแกรม MATLAB จึงเป็นสิ่งที่สะดวกสำหรับการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ซึ่งแสดงเป็นกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ แล้วจึงนำกราฟที่ได้นี้ไปวิเคราะห์หาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ

4.2 **การตอบสนองเชิงความถี่** (Frequency Response)

การตอบสนองเชิงความถี่คือการตอบสนองของระบบพลศาสตร์ในช่วงสถานะอยู่ตัว (Steady State Response) เมื่อสัญญาณเข้า (Input Signal) ที่สั่งการทำงานของระบบเป็นสัญญาณไซนูซอยด์ (Sinusoidal) ที่ช่วงความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ที่สนใจ

โดยทั่วไปการหาผลการตอบสนองเชิงความถี่สามารถหาได้จากสมการฟังก์ชั่นถ่ายโอน โดยการพิจารณาที่ตำแหน่งโพล (Pole) และซีโร่ (Zero) ของระบบที่สนใจ ผลการตอบสนองเชิงความถี่สามารถแสดงในรูปแบบกราฟที่เรียกว่า Bode Plot ซึ่งเป็นการเขียนเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่บนแกนลอกการิทึม (Logarithmic) กับขนาดและค่ามุมเฟส ข้อได้เปรียบของการเขียนกราฟบนสเกลลอกการิทึม คือ การคูณของฟังก์ชั่นที่เขียนในสเกลเชิงเส้นจะถูกเปลี่ยนเป็นการบวกในสเกลลอกการิทึม และการหารในสเกลเชิงเส้นจะถูกเปลี่ยนเป็นการลบในสเกลลอกการิทึม (21)

จากสมการฟังก์ชั่นถ่ายโอนในรูปแบบโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เมื่อแทนค่า s ด้วย $j\omega$ จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 83

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\phi(j\omega)} = |G(j\omega)|\angle\phi(\omega) \qquad (83)$$

เมื่อ $\angle\phi(\omega) = \tan^{-1}\dfrac{\mathrm{Im}(\omega)}{\mathrm{Re}(\omega)}$

Im(ω) คือ ส่วนจินตภาพของ G($j\omega$)

Re(ω) คือ ส่วนจริงของ G($j\omega$)

$|G(j\omega)|^2 = \mathrm{Re}^2(\omega) + \mathrm{Im}^2(\omega)$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับขนานจะมีแกนนอนเป็นความถี่และแกนตั้งเป็นอัตราขยายลอกการิทึมซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 84 ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

$$Logarithmic\ gain = 20\log_{10}|G(j\omega)| \quad (84)$$

แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบได้ จึงต้องอาศัยผลการตอบสนองเชิงความถี่มาเป็นแนวทางในการหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ โดยผลการตอบสนองเชิงความถี่นั้นสามารถหามาจากการนำข้อมูลในทดลองซึ่งอยู่บนโดเมนของเวลาไปผ่านการทำการแปลงฟูรีเยแบบเร็ว (FFT) เพื่อให้ข้อมูลเปลี่ยนไปอยู่บนโดเมนความถี่ตามที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว จากนั้นจึงนำข้อมูลนี้ไปแสดงเป็นกราฟของผลการตอบสนองเชิงความถี่

4.3 การหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกนั้นมีการหาหลากหลายวิธีซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Parametric และ Non-parametric (25) โดยแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมกับงานวิจัยที่มีลักษณะของข้อจำกัดแตกต่างกัน

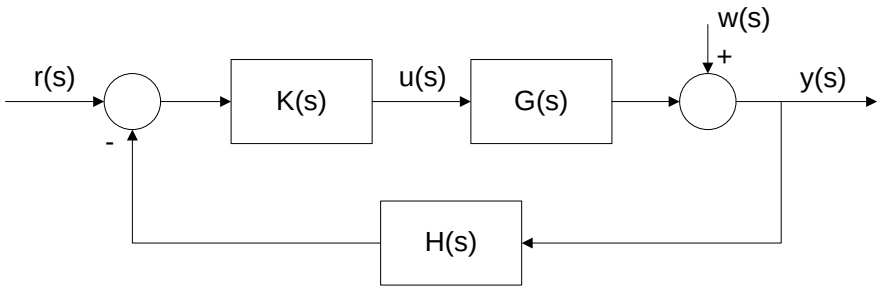
Parametric คือ การหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจำเป็นต้องทราบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายระบบย่อยภายในแล้วจึงสามารถนำสมการมาประกอบรวมกันเพื่ออธิบายถึงระบบใหญ่ได้ ซึ่งหากการอธิบายระบบย่อยบางระบบไม่ มีความแม่นยำเพียงพอ ก็ ทำให้ไม่สามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมได้ และอาจจะส่งผลให้สมการที่แสดงระบบรวมเกิดความผิดพลาดได้

Non-parametric คือ การ หาลักษณะโมเดลของระบบ (Non-parametric model) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออก (Physical significance) ด้วยการทำการทดลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ โดยไม่จำเป็นต้องทราบโครงสร้างของระบบ (System's Structure) การทำการทดลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์นี้จำเป็นต้องทำการทดลองจำนวนมากเพื่อให้ระบบที่หามานั้นมีความน่าเชื่อถือ และยิ่งเป็นงานทดลองที่มีตัวแปรเป็นมนุษย์เข้ามา

เกี่ยวข้องยิ่งจำเป็นต้องเลือกผู้ทดสอบที่มีความหลากหลายเพื่อดูความแตกต่างของระบบว่าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของมนุษย์ที่แตกต่างกันหรือไม่

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่สามารถระบุฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบได้ และการหาลักษณะโมเดลของระบบเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกแบบ Non-parametric เหมาะสำหรับงานวิจัยที่ไม่สามารถระบุโครงสร้างของระบบ ดังนั้นจึง ศึกษาวิธีเกี่ยวข้องที่ทำการหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนแบบ Non-parametric พบว่ามีหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมคือ Closed loop identification ซึ่งประกอบด้วย Direct method และ Indirect method (25)(26)

Direct Method เป็นการหาโมเดลของระบบที่สนใจ G(s) ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยวัดค่าสัญญาณเข้า u(s) และสัญญาณออก y(s) แล้วนำไปหาการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ด้วยสมการที่ 76



ภาพที่ 27 Feedback Loop ของระบบ G(s)

โดยสมการดังกล่าวมาจากสมการเริ่มต้นดังแสดงในสมการที่ 85

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) + W(s) \tag{85}$$

แล้วสมมติว่า U(s) >> W(s) จะได้ว่า

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

ส่วน Indirect method ต่างจาก Direct method คือวิธีนี้จะสนใจสัญญาณเข้า r(s) และ y(s) ซึ่งอยู่นอก Feedback loop ของระบบ

การศึกษางานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบที่คล้ายคลึงกันจะช่วยให้สามารถหาโมเดลของระบบได้ง่ายขึ้น ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ในการหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ด้วย Closed loop identification แบบ Direct method ได้แก่

งานวิจัยของ Andrew James Pick and D J Cole (13) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางพลวัติของการจับพวงมาลัยของผู้ขับขี่ (Dynamics Properties of a Driver's Arms Holding a Steering) อธิบายหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนพวงมาลัยที่เปลี่ยนแปลงไปกับทอร์กที่สร้างแรงที่พวงมาลัย โดยมีสัญญาณเข้า คือ แรงต้านที่พวงมาลัย (Torque) กับสัญญาณออก คือ มุมการหมุนพวงมาลัย (Steering Angle) นอกจากนี้งานวิจัยยังอธิบายว่าระบบมวล ตัวหน่วง และสปริงที่มี 1 องศาอิสระ(Single-Degree-of-Freedom) เหมาะสำหรับการโมเดลแขนของผู้ขับขี่มากกว่าระบบที่มีหลายองศาอิสระ (Multiple-Degree-of-Freedom) โดยโมเดลของผู้ทดสอบแต่ละคนมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

Tom Pilutti (26) ศึกษาเรื่องการหาโมเดลของผู้ขับขี่สำหรับการควบคุมรถยนต์ให้อยู่ในเส้นทาง (Identification of driver state for Lane-keeping task) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นทดลองด้วยโมเดลรถยนต์แบบ 4 ล้อ (Full-Vehicle Driving Simulator) โดยสนใจความสัมพันธ์ระหว่างการเลื่อนออกจากแนวขอบถนนของรถยนต์กับการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ โดยมีสัญญาณเข้าคือ ระยะที่เลื่อนออกจากแนวขอบถนน ส่วนสัญญาณออกคือ การบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ พบว่าผลของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ไม่มีผลโดยตรงต่อการควบคุมรถยนต์ตามเส้นทาง

B Mashadi and D A Crolla (15) ศึกษาเรื่องผลของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่มีต่อพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่บนรถยนต์ส่วนบุคคล (Influence of Ride Motions on the Handling Behavior of a Passenger Vehicle) โดยการทดลองใช้สัญญาณเข้าเป็น Unit Step ของการหมุนของพวงมาลัย (Steering Angle) แล้วศึกษาผลของสัญญาณออกของการควบคุมทิศทาง (Handling) และโมเดลการเคลื่อนที่ของรถยนต์ พบว่าผลการทดลองเมื่อขับขี่บนพื้นถนนแบบไซนูซอยด์ (Sinusoidal) กับแบบสุ่ม (Random) นั้นให้ผลการตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) ที่แตกต่างกัน

ส่วนในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Non-parametric เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบ เนื่องจากระบบย่อยภายในมีมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งไม่สามารถหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำเพื่อมาอธิบายพฤติกรรมของมนุษย์ได้ การทำการทดลองกับผู้ทดสอบที่หลากหลายจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับหาการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ของระบบนี้ ซึ่งวิธีการทดลองและรายละเอียดในการทดลองต่างๆ จะอธิบายในบทต่อไป

บทที่ 5
การทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 พบว่ามีงานวิจัยที่ทำการทดลองเพื่อหาลักษณะของระบบ (System Model) มากมาย แต่ยังไม่มีงานวิจัยที่หาลักษณะของระบบซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่กับการโคลงของรถยนต์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาปรับเปลี่ยนให้เข้ากับงานวิจัยที่ต้องการศึกษา เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาลักษณะของระบบโดยแสดงเป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) โดยนำข้อมูลจากการทดสอบมาหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบแล้วจึงนำมาระบุลักษณะของระบบอีกขั้นหนึ่ง ดังนั้นการทดสอบจึงจำเป็นต้องนำสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่เกิดขึ้นมาพิจารณา เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบในขั้นตอนต่อไป

ในบทนี้จะอธิบายรายละเอียดของการทดลองตั้งแต่สภาวะในการทดสอบ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การจัดเตรียมการทดลองซึ่งระบุตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และการเตรียมโปรแกรมสำหรับบันทึกข้อมูล ขั้นต อนการทดสอบ ผลการทดลองซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลระหว่างการทดลอง และวิธีการนำข้อมูลบนโดเมนของเวลามาแปลงให้เป็นข้อมูลบนโดเมนความถี่เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์หาผลการตอบสนองเชิงความถี่

5.1 สภาวะในการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่กับการโคลงของรถยนต์ ดังนั้นในการทดลองจึงต้องการเก็บข้อมูลมุมการโคลงของรถยนต์และมุมการหมุนพวงมาลัยที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ โดยงานวิจัยได้ทำการทดลองด้วยระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่จำลองยานพาหนะ 2 ลักษณะ คือ การทดลองสำหรับรถยนต์และการทดลองสำหรับรถสามล้อหรือที่นิยมเรียกกันว่า รถตุ๊กตุ๊ก เนื่องจากผู้ทำวิจัยเห็นว่าการโคลงของรถสามล้อจะมีผลต่อการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ที่เห็นชัดเจนกว่าการโคลงของรถยนต์

ในการทดสอบได้กำหนดลักษณะของผู้ทดสอบไว้เป็นเกณฑ์เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกลุ่มคนที่นำมาศึกษา โดยลั กษณะที่ใช้ในการการคัดเลือกผู้ทำการทดสอบมีดังนี้ ช่วงอายุของผู้ทดสอบซึ่งกำหนดไว้ให้มีอายุระหว่าง 20 – 25 ปี จำนวนผู้ทดสอบประกอบด้วยผู้ชายจำนวน 18 คนและผู้หญิงจำนวน 15 คน ซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 45 – 80 กิโลกรัม และส่วนสูง 150 – 185 เซนติเมตร โดยผู้ทดสอบทุกคน จะต้องเคยมีประสบการณ์ในการขับรถยนต์บนถนนจริง

การกำหนดลักษณะอิริยาบถขณะทดสอบของผู้ทดสอบจะทำให้ผู้ทดสอบทุกคนอยู่ในท่านั่งพิงพนักเก้าอี้และจับพวงมาลัยในลักษณะเดียวกันทั้งหมด เ ป็นการสร้างสภาวะแวดล้อมในการทดสอบที่เหมือนกันให้ผู้ขับขี่ทุกคนเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นได้สะดวก โดยขณะทดสอบจะปรับพนักพิงของที่นั่งเอียงประมาณ 95 องศาเพื่อให้ผู้ทดสอบนั่งหลังตรงและจับพวงมาลัยโดยแขนท่อนล่างทำมุมกับแขนท่อนบนประมาณ 120 องศา เพื่อไม่ให้แขนตึงและเกิดการเกร็งของกล้ามเนื้อแขนขณะทดสอบ รวมทั้งไม่ให้ผู้ทดสอบออกแรงต้านการเคลื่อนที่ของพวงมาลัย ส่วนลักษณะการจับพวงมาลัย รถยนต์ของผู้ทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การจับพวงมาลัยสองมือที่ตำแหน่งด้านข้าง และการจับพวงมาลัยมือข วาเดียวที่ตำแหน่งด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 28 (a) และ (b) ตามลำดับ ส่วน ลักษณะการจับพวงมาลัยรถสามล้อแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะเช่นกัน คือ การจับตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 29 (a) และ (b) ตามลำดับ

(a) (b)

ภาพที่ 28 ลักษณะการจับพวงมาลัยรถยนต์ของผู้ทดสอบ

(a) (b)

ภาพที่ 29 ลักษณะการจับพวงมาลัยรถสามล้อของผู้ทดสอบ

นอกจากนี้ในการทดสอบยังกำหนดค่ามุมเริ่มต้นของการโคลงให้อยู่ที่ 10 องศา ขณะเริ่มต้นนี้จะจับพวงมาลัยเหมือนการจับในลักษณะการขับทางตรง โดย กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของพวงมาลัยให้กำหนดเป็นศูนย์องศาอยู่ที่ตำแหน่งที่แขนทั้ง 2 ข้างขนานกันเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือซ้ายและมือขวาที่ด้านข้างของพวงมาลัย เมื่อเริ่มการทดสอบจะใช้สัญญาณเข้าเป็น Unit Step Input คือปล่อยโคลงลงบนเบาะที่รองด้านล่างทำให้มุมการโคลงเปลี่ยนจาก 10 องศาเป็นศูนย์องศาอย่างรวดเร็ว

ในการทดสอบสำหรับรถยนต์จะเก็บข้อมูลของสัญญาณเข้าและสัญญาณออก 6 รอบต่อผู้ทดสอบหนึ่งคน ประกอบด้วย ข้อมูลการทดสอบโดยจับพวงมาลัย 2 มือทั้งหมด 3 ครั้ง และการทดสอบโดยจับมือเดียว 3 ครั้ง ส่วนในการทดสอบสำหรับรถสามล้อจะเก็บข้อมูลของสัญญาณเข้าและสัญญาณออก 6 รอบต่อผู้ทดสอบหนึ่งคนเช่นกัน ประกอบด้วย ข้อมูลการทดสอบโดยจับพวงมาลัยสามล้อที่ตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร (ใกล้จุดหมุน) ทั้งหมด 3 ครั้ง และตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร (ไกลจุดหมุน) ทั้งหมด 3 ครั้ง

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ในเก็บข้อมูลของค่าสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือเพื่อวัดค่าสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่เวลาต่างๆ รวมถึง ควบคุมการเก็บข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่เวลาต่างๆ ดังนี้

1. โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ เมื่อต่ออุปกรณ์เข้ากับวงจรไฟฟ้า ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจะแสดงผลออกมาในรูปแรงดันไฟฟ้า จึงนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นหรือเชิงมุม โพเทนชิโอมิเตอร์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้น (Linear Potentiometer) จะใช้ในการวัดระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวเส้นตรง และโพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงมุม (Rotary Potentiometer) ใช้สำหรับวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการหมุนเกิดขึ้น (27)

ในการทดลองนี้เลือกใช้โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 30 สำหรับวัดสัญญาณเข้าในช่วงเวลาต่างๆ และใช้สมการทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่ามุมโคลงของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ ซึ่งรายละเอียดของโพเทนชิโอมิเตอร์จะแสดงในภาคผนวก ค

ภาพที่ 30 โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงเส้น (28)

2. เอนโคดเดอร์ (Encoder) เป็นอุปกรณ์ แปลงค่า Pulse ที่เกิดขึ้นเป็นตำแหน่งเลื่อนหรือการหมุน โดยจะมีตำแหน่งอ้างอิงเพื่อใช้ในการวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งอ้างอิงนั้น เอนโคดเดอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่ง การเลื่อน (linear

encoder) ใช้ในการวัดระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวเส้นตรง และเอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งการหมุน (rotary encoder) ใช้ในการวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งอ้างอิง

ในการทดลองนี้เลือกใช้เอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งการหมุนดังแสดงในภาพที่ 31 สำหรับวัดค่ามุมพวงมาลัยที่เปลี่ยนแปลงไปขณะระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เกิดการโคลงที่ช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของเอนโคดเดอร์จะแสดงในภาคผนวก ค

ภาพที่ 31 เอนโคดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งการหมุน (29)

3. NI CompactRIO เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ส่งผ่านข้อมูลและประมวลผลดังแสดงในภาพที่ 32 โดยอาศัยโปรแกรมที่อุปกรณ์นี้สามารถรองรับได้ในการควบคุมการทำงานและประมวลผล อุปกรณ์นี้มีช่องการส่งสัญญาณเข้าออกหลายประเภทให้เลือกใช้ โดยช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ช่องสัญญาณ Hi-speed สำหรับอ่านค่าสัญญาณเอนโคดเดอร์ ช่องสัญญาณ Analog Input สำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากโพเทนชิโอมิเตอร์ โดยรายละเอียดของช่องสัญญาณที่ใช้งานจะแสดงในภาคผนวก ค

ภาพที่ 32 อุปกรณ์ประมวลผล NI CompactRIO (30)

4. LabVIEWS® เป็นโปรแกรมที่อุปกรณ์ประมวลผล (NI CompactRIO) รองรับ ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล รวมทั้งเก็บข้อมูล โดย การเขียนโปรแกรมนี้ใช้เป็นภาษาภาพ (graphical language) ที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ เริ่มจากการอ่านค่าสัญญาณเข้าแล้วผ่านการประมวลผลเพื่อแสดงค่าในหน่วยวัดที่เราต้องการ เช่น การอ่านค่า pulse จากเอนโคดเดอร์แล้วนำมาคำนวณให้แสดงเป็นค่ามุมการหมุนของพวงมาลัยที่เกิดขึ้น ส่วนการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากโพเทนชิโอมิเตอร์แล้วนำมาคำนวณให้แสดงเป็นค่ามุมการโคลงของรถยนต์

5. Accelus เป็นแอมพิไฟเออร์ (Amplifier) ดังแสดงในภาพที่ 33 ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ในการทดลองจะใช้เป็นเพียงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจ่ายไฟเข้า 5 V ให้แก่อุปกรณ์วัดค่าต่างๆ โดยรายละเอียดของช่องสัญญาณที่ใช้งานจะแสดงในภาคผนวก ค

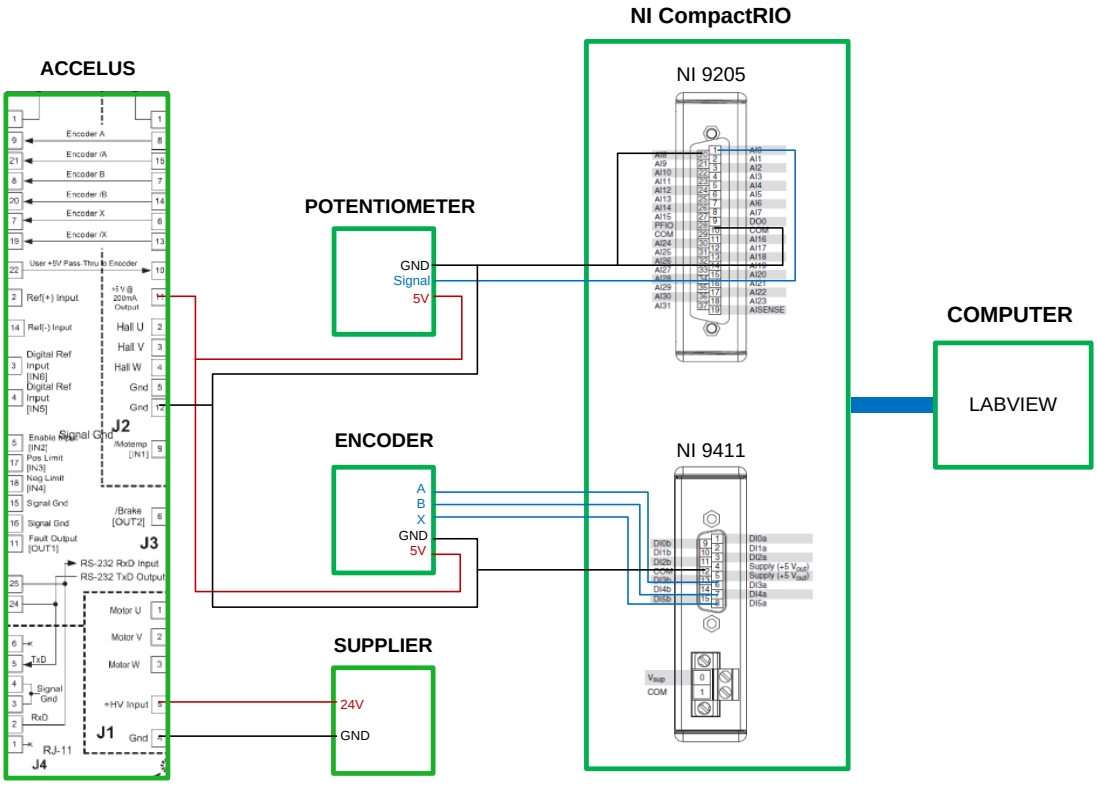
ภาพที่ 33 Accelus (31)

5.3 การจัดเตรียมการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ บนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ โดยติดโพเทนชิโอมิเตอร์ระหว่างโครงสร้างใหญ่กับแขนที่เคลื่อนที่เพื่อใช้วัดระยะที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวเส้นตรงแล้วแปลงค่าเป็นมุมการโคลงที่เกิดขึ้น ส่วนเอนโคดเดอร์ติดที่แกนหมุนของพวงมาลัยเพื่อวัดมุมการหมุนของพวงมาลัยที่เกิดขึ้นในเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 34

ภาพที่ 34 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

2. ต่อสายไฟเลี้ยง สายดิน และสายสัญญาณต่างๆ เข้ากับ NI CompactRIO เพื่อรับสัญญาณเข้ามาอ่านค่า และส่งสัญญาณออกไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 35



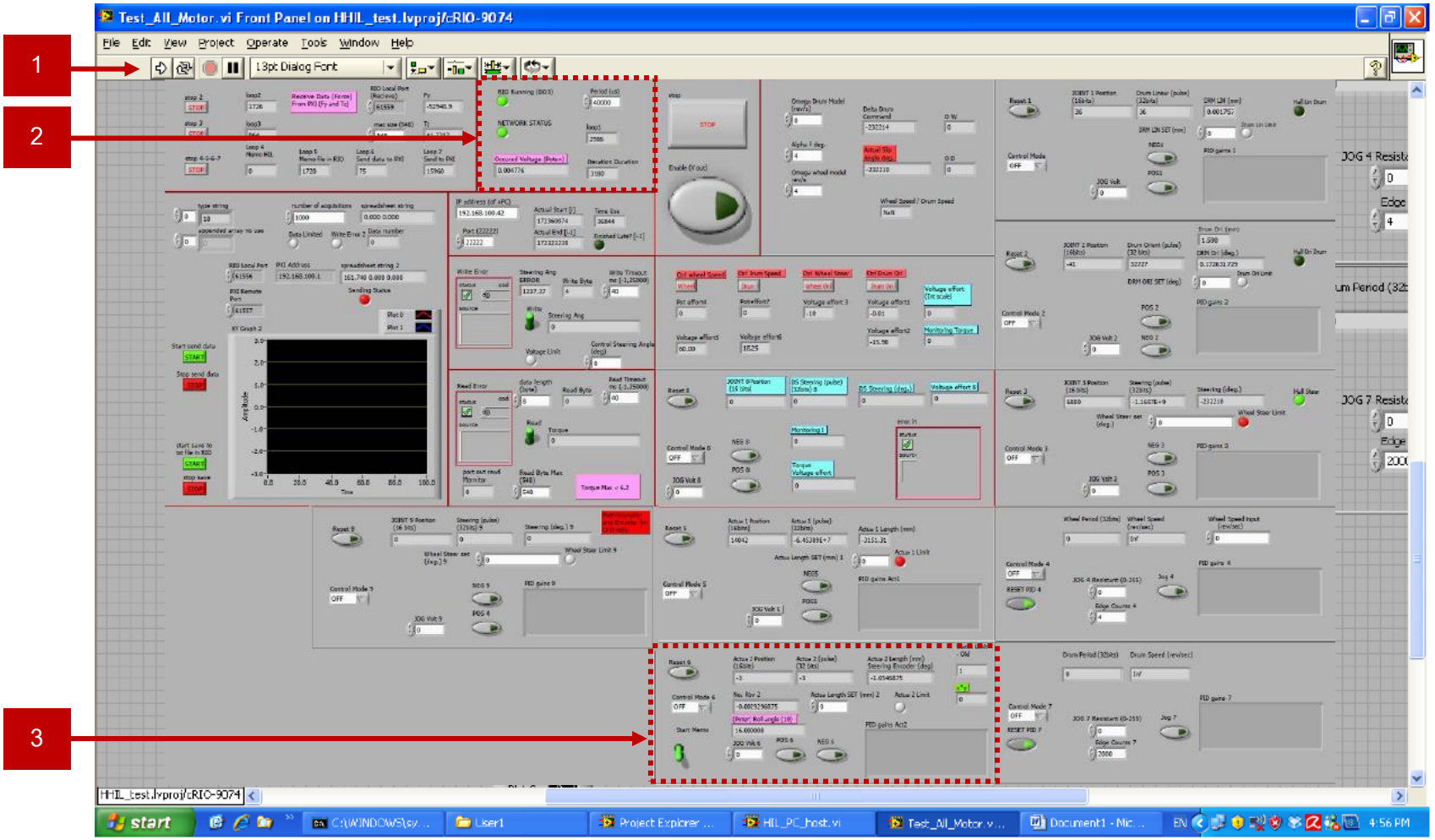
ภาพที่ 35 การเชื่อมต่อสายสัญญาณของอุปกรณ์ต่างๆ

3. จากนั้นจึงเปิดโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อโปรแกรมควบคุม NI CompactRIO สำหรับอ่านค่าที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ รวมทั้งควบคุมการเก็บข้อมูลที่เวลาต่างๆด้วย

5.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดสอบจำลองการโคลงของรถยนต์จะแบ่งลักษณะการจับพวงมาลัยออกเป็น 2 แบบ คือ การจับด้วยสองมือที่ตำแหน่งด้านข้างของพวงมาลัย และการจับมือขวาข้างเดียวที่ตำแหน่งด้านข้างของพวงมาลัย ส่วนการทดสอบจำลองการโคลงของรถสามล้อจะแบ่งลักษณะการจับเป็น 2 แบบ คือ จับพวงมาลัยสามล้อที่ตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร (ใกล้จุดหมุน) และตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร (ไกลจุดหมุน) โดยในการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลแต่ละลักษณะการจับจำนวน 3 ครั้งต่อผู้ทดสอบหนึ่งคน และมี ขั้นตอนการทดสอบของการจับแต่ละลักษณะจะเหมือนกันทุกขั้นตอนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

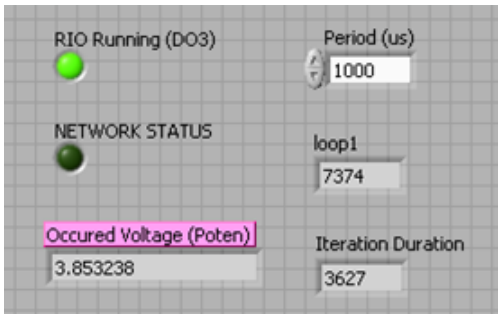
1. เริ่มจากเปิดโปรแกรม LabVIEWS® ซึ่งใช้ควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล จะแสดงหน้าจอสำหรับอ่านค่าดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 หน้าจอสำหรับอ่านค่าของโปรแกรม LabVIEWS®

จากภาพที่ 36 หมายเลข 1 แสดงส่วนควบคุมการ Run โปรแกรม หมายเลข 2 แสดงส่วนการตั้งค่าในการเก็บข้อมูล และหมายเลข 3 แสดงส่วนหน้าจอสำหรับอ่านค่าจากอุปกรณ์วัดต่างๆ

ก่อนเริ่ม Run โปรแกรมต้องตั้งค่าในการเก็บข้อมูลในช่อง Period ให้เก็บข้อมูล 1000 ข้อมูลในเวลา 1 วินาทีดังแสดงในภาพที่ 37 จากนั้นจึงกดปุ่ม Run โปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 37 การตั้งค่าช่อง Period เป็น 1000 μs

ภาพที่ 38 ปุ่ม Run โปรแกรม

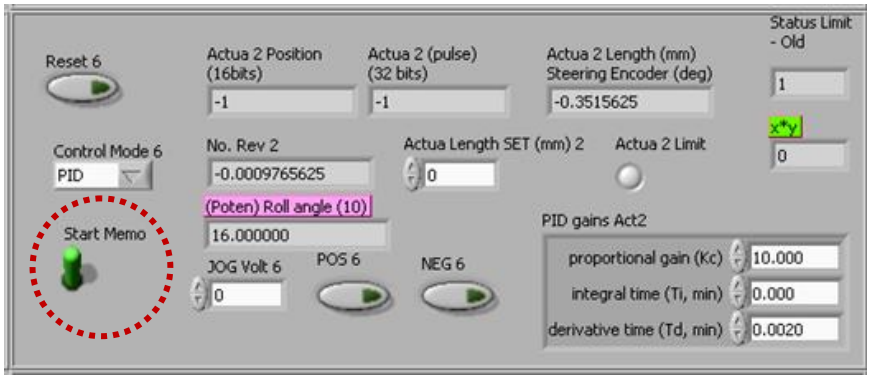
2. ให้ผู้ทดสอบขึ้นนั่งบนระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ จากนั้นจึงจัดท่านั่งเริ่มต้นตามสภาวะการทดสอบที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แล้วจึงเริ่มจับพวงมาลัยให้ แขนทั้ง 2 ข้างขนานกัน เพื่ออ้างอิงตำแหน่งเริ่มต้นโดยกำหนดให้เป็นศูนย์องศาอยู่ที่ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 39

ภาพที่ 39 ตำแหน่งการจับพวงมาลัยเริ่มต้นกำหนดให้เป็นศูนย์องศา

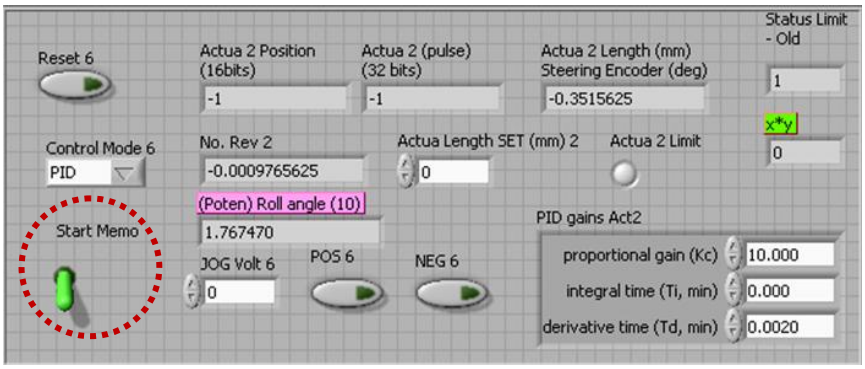
3. ยกโครงสร้างระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ให้เอียงที่มุมการโคลง 10 องศาซึ่งกำหนดให้เป็นมุมเริ่มต้นดังแสดงในภาพที่ 40

ภาพที่ 40 ยกโครงสร้างให้เอียงที่มุมการโคลง 10 องศาซึ่งเป็นมุมเริ่มต้น

4. กดปุ่มบนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมเพื่อเริ่มเก็บข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 41 โดยเก็บข้อมูลขณะที่โครงสร้างเกิดการเอียงที่มุมโคลงเริ่มต้น 10 องศาประมาณ 5 วินาทีก่อนปล่อยโครงสร้างจากตำแหน่งเริ่มต้นให้กลับมาที่ตำแหน่งการโคลง 0 องศา เมื่อโครงสร้างกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นแล้วจะเก็บข้อมูลต่อไปอีก 5 วินาทีเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วน แล้วจึงกดปุ่มเดิมบนหน้าจอแสดงผลให้หยุดการเก็บข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 41 และ 42



ภาพที่ 41 ปุ่มบนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมขณะมีการเก็บข้อมูล

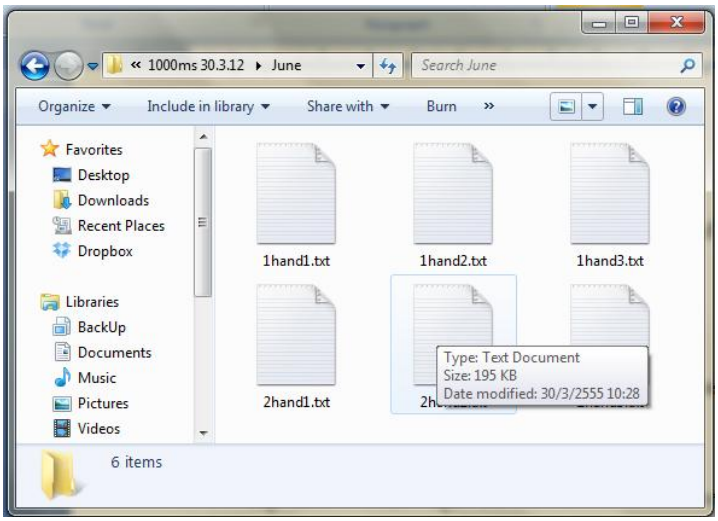


ภาพที่ 42 ปุ่มบนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมขณะหยุดเก็บข้อมูล

5. กดปุ่มหยุด Run โปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 43 เพื่อให้โปรแกรมทำการเซฟข้อมูลลงในไฟล์ที่กำหนดไว้

ภาพที่ 43 กดปุ่มหยุด Run โปรแกรม

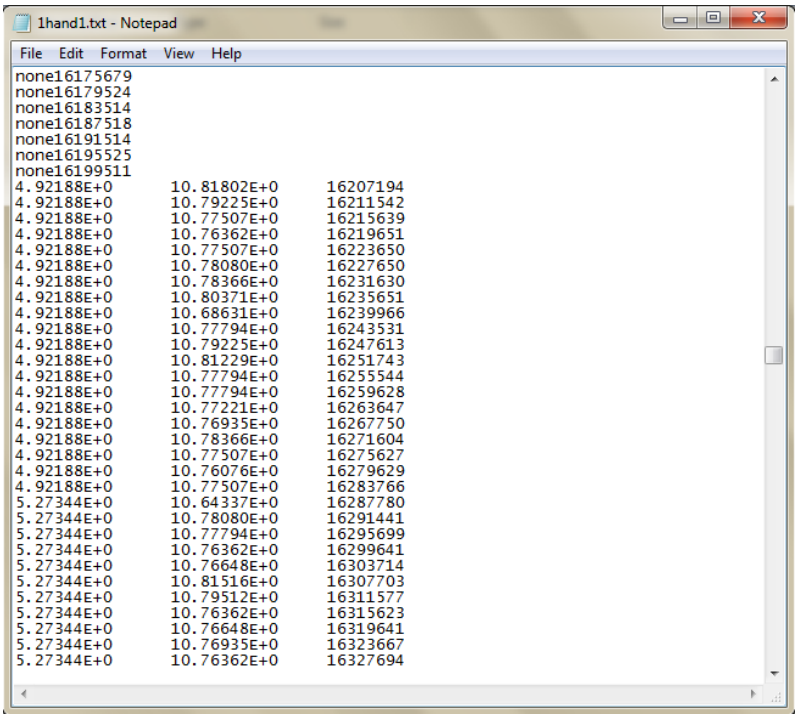
6. เก็บข้อมูลที่ได้ออกมาเป็นไฟล์ .txt ดังแสดงในภาพที่ 44 แล้วนำไปประมวลผลเพื่อหาผลการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB



ภาพที่ 44 ข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองซึ่งอยู่ในรูปแบบไฟล์ .txt

5.5 ผลการทดลอง

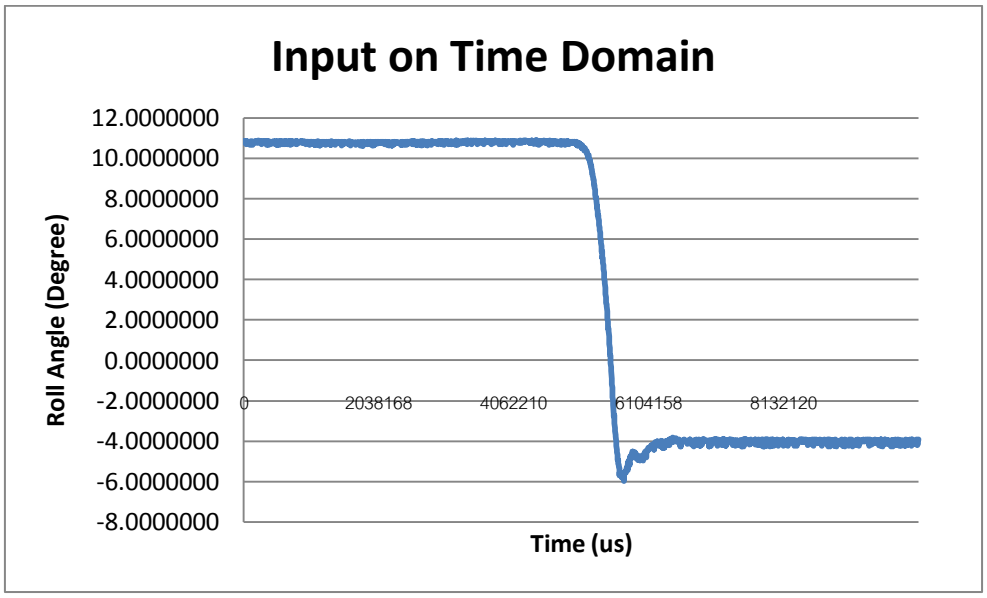
ข้อมูลในไฟล์ .txt ดังแสดงในภาพที่ 45 ได้มาจากการทำการทดลองซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของมุมการโคลงของรถยนต์ มุมการเลี้ยวของพวงมาลัยและเวลา โดยข้อมูลเหล่านี้อยู่บนโดเมนของเวลา (Time Domain)



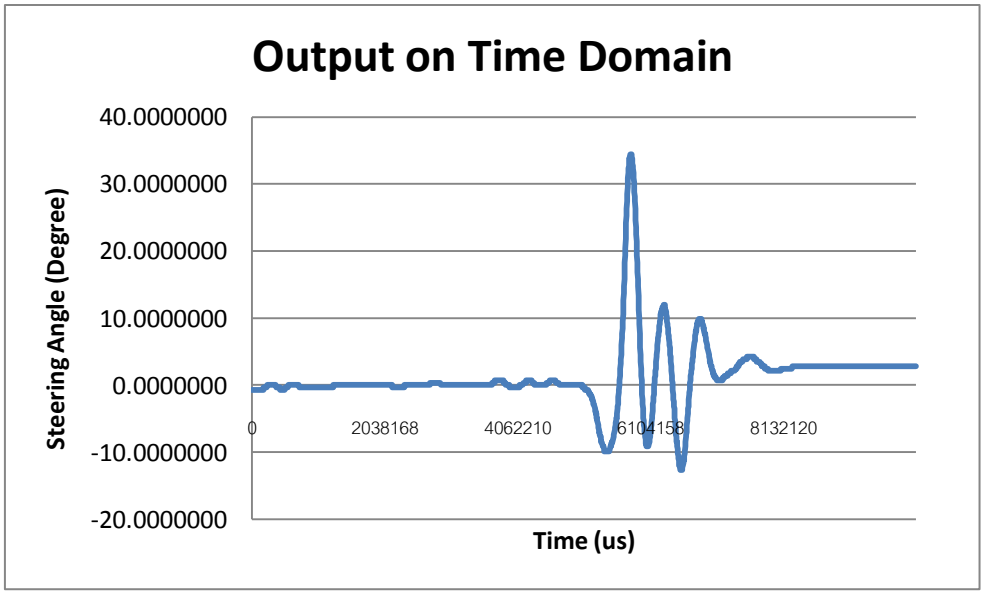
ภาพที่ 45 ไฟล์ .txt ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

จากภาพที่ 45 จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้นี้ประกอบด้วย 3 สดมภ์ โดยสดมภ์แรกจะแสดงมุมการหมุนของพวงมาลัย สดมภ์ที่สองแสดงมุมการโคลงของรถยนต์ และสดมภ์ที่สามแสดงเวลา หน่วยเป็น μs

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาแสดงเป็นกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับเวลาดังแสดงในภาพที่ 46 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวของพวงมาลัยกับเวลาดังแสดงในภาพที่ 47



ภาพที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับเวลาของผู้ทดสอบคนที่ 1



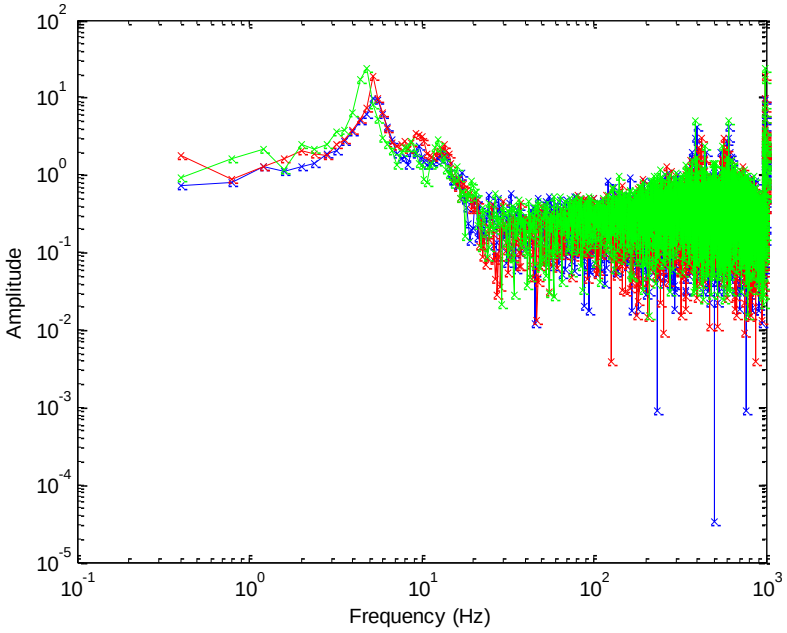
ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวของพวงมาลัยกับเวลาของผู้ทดสอบคนที่ 1

จากภาพที่ 46 และ 47 เป็นตัวอย่างโดยใช้ข้อมูลของผู้ทดสอบคนแรกเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดของการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาแสดงเป็นกราฟบนโดเมนของเวลาของข้อมูลที่ได้จากผู้ทดสอบทั้งหมดจะแสดงในภาคผนวก ง

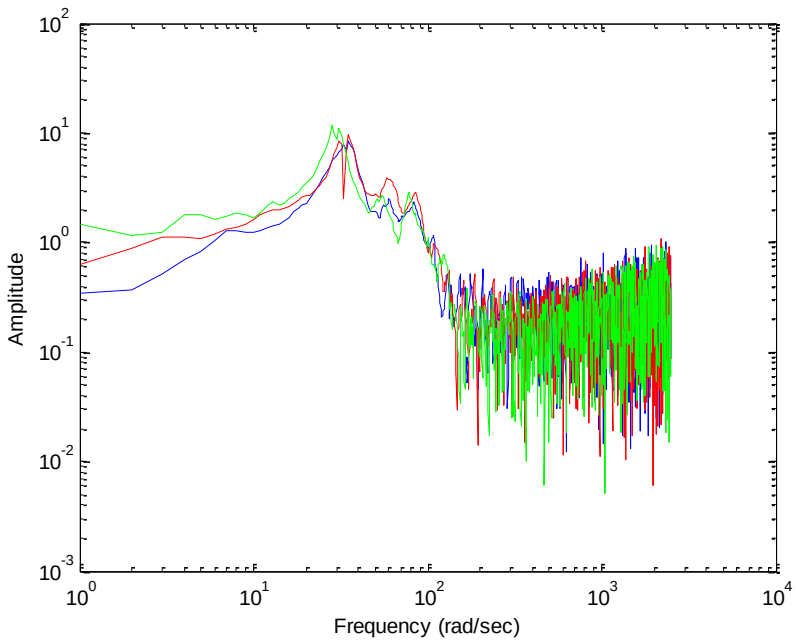
5.6 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งเรียกว่า ผลการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นข้อมูลบนโดเมนของเวลา (Time Domain) จึงต้องทำการแปลงข้อมูลซึ่งอยู่บนโดเมนของเวลาให้เป็นข้อมูลที่อยู่บนโดเมนความถี่ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนต่อไป

วิธีการแปลงข้อมูลที่อยู่บนโดเมนของเวลาให้มาอยู่บนโดเมนความถี่จะใช้พื้นฐานความรู้ในเรื่องการแปลงลาปลาสและการแปลงฟูรีเย การแปลงข้อมูลลักษณะนี้มีหลายวิธีด้วยกันซึ่ งวิธีที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ การแปลงฟูรีเยแบบเร็ว (Fast Fourier Transform) และการวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัม (Spectral Analysis) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทั้ง 2 วิธีนี้ในการแปลงข้อมูลบนโดเมนของเวลาให้มาอยู่บนโดเมนความถี่ ซึ่งผลที่ได้จากการแปลงข้อมูลทั้ง 2 วิธีได้แสดงเป็นกราฟดังภาพที่ 48 และ 49



ภาพที่ 48 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่จากการแปลงฟูรีเยแบบเร็ว



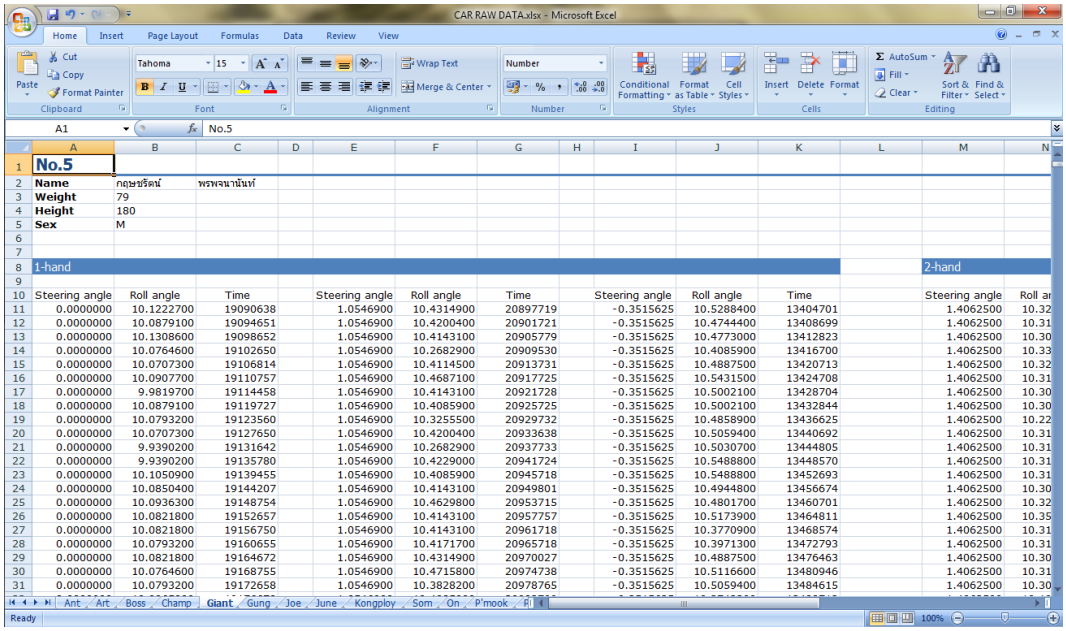
ภาพที่ 49 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่จากวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม

จากภาพที่ 48 และ 49 จะเห็นว่าการใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมจะได้กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่มีความต่อเนื่องมากกว่า เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ด้วย วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมนี้จะมีขั้นตอนการกรองสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่วัดจริง ทำให้ข้อมูลและกราฟที่ได้มีความต่อเนื่อง ดังนั้นในงานวิ จัยนี้จึงเลือกใช้กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่ผ่านวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ ซึ่งได้เลือกใช้ฟังก์ชั่น spa ในโปรแกรม MATLAB สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยมีการทดลองนำข้อมูลจากการจำลองโมเดลอย่างง่ายใน MATLAB Simulink มาวิเคราะห์ด้วยคำสั่งดังกล่าว เพื่อตรวจสอบว่าคำสั่งที่ใช้นั้นให้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำเพียงพอ ซึ่งส่วนรายละเอียดในการทดสอบจะกล่าวไว้ในภาคผนวก

ขั้นตอนการนำข้อมูลบนโดเมนของเวลามาแปลงให้อยู่บนโดเมนความถี่เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาฟังก์ชั่นถ่ายโอนมีดังต่อไปนี้

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นไฟล์ .txt มาใส่ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อความสะดวกในการใช้แปลงข้อมูลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเป็นบนโดเมนของเวลา (Time Domain) ซึ่งเก็บค่ามุมการหมุนของพวงมาลัยและมุมการโคลงของ

ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์เทียบกับเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล โดย มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 50

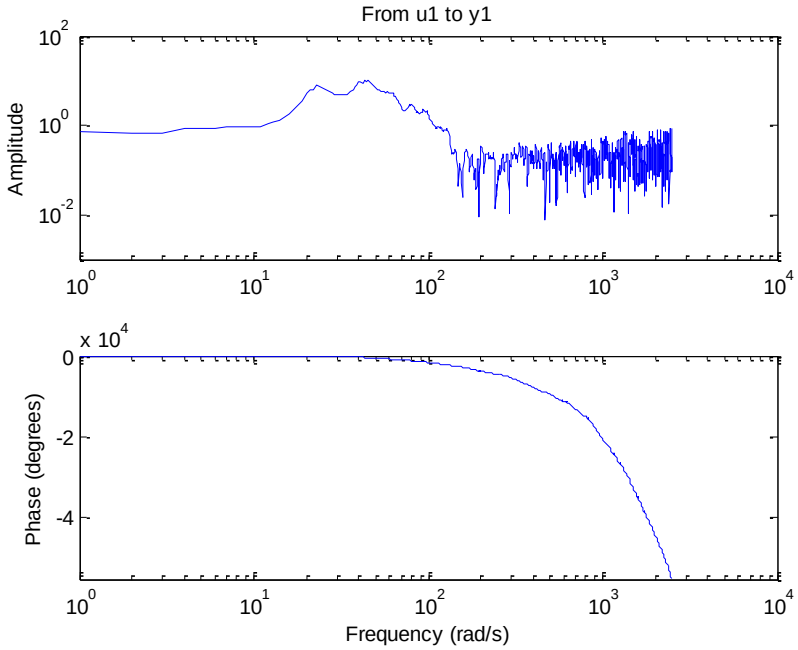


ภาพที่ 50 ข้อมูลในโดเมนของเวลาในโปรแกรม Microsoft Excel

2. ตัดข้อมูลซ้ำส่วนต้นและส่วนปลายซึ่งไม่มีผลกับกราฟในส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ออก เพื่อให้จำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับแปลงค่าให้เป็นค่าบนโดเมนความถี่มีจำนวนเท่ากันทุกคน โดยให้ข้อมูลของผู้ทดสอบมีจำนวน 2500 ข้อมูลเท่ากันทั้งหมด นอกจากจะใช้จำนวนข้อมูลที่เท่ากันแล้วยังกำหนดให้จำนวนจุดที่เกิดขึ้นบนกราฟแสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่หลังจากแปลงข้อมูลบนโดเมนเวลาให้อยู่บนโดเมนความถี่มีจำนวนเท่ากันทั้งหมด คือ 2500 จุดด้วย

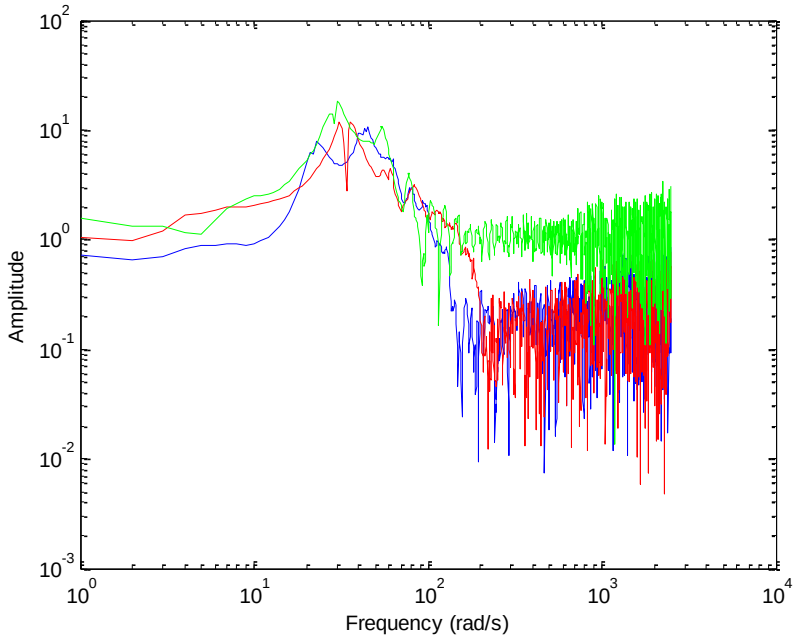
3. ใช้โปรแกรม MATLAB ในการแปลงข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมตามทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 4 ด้วยคำสั่งสำเร็จรูป spa ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB และเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อให้แสดงผลออกมาเป็นกราฟของผลการตอบสนองเชิงความถี่ โดยรายละเอียดการใช้โปรแกรมจะแสดงไว้ในภาคผนวก จ ข้อมูลบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ที่แสดงเป็นกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ประกอบด้วย กราฟของขนาด (Amplitude) ซึ่งมีแกนนอนเป็นความถี่ที่มีหน่วยเป็น rad/s แกนตั้งเป็นขนาดที่ไร้หน่วย และกราฟของเฟส (Phase) ซึ่งมีแกนนอน

เป็นความถี่มีหน่วยเป็น rad/s แกนตั้งเป็นเฟสมีหน่วยเป็นองศา (Degrees) โดยกราฟทั้งสองมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 51

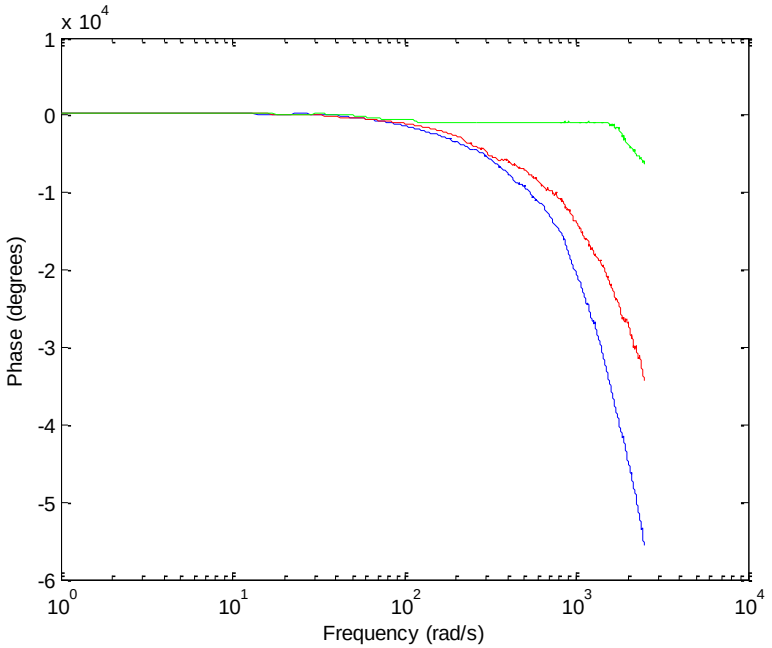


ภาพที่ 51 กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบคนที่ 1

เนื่องจากในการทดลองได้เก็บข้อมูลการทดสอบแบบเดียวกันทั้งหมด 3 ครั้ง จึง นำข้อมูลของการทดสอบแบบเดียวกันที่ได้ผู้ทดสอบแต่ละคนมาแสดงอยู่บนกราฟเดียวกัน โดยกราฟขนาดจะแสดงบนแกนนอนและแกนตั้งที่เป็นแกนลอการิทึม (Logarithm) ดังแสดงในภาพที่ 52 ส่วนเฟสจะแสดงบนแกนนอนที่เป็นแกนลอการิทึมและแกนตั้งเป็นแกนเชิงเส้นปกติดังแสดงในภาพที่ 53 การแสดงกราฟบนแกนเดียวกันจะช่วยให้เห็นถึงแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ครั้งว่ามีความใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันอย่างไร



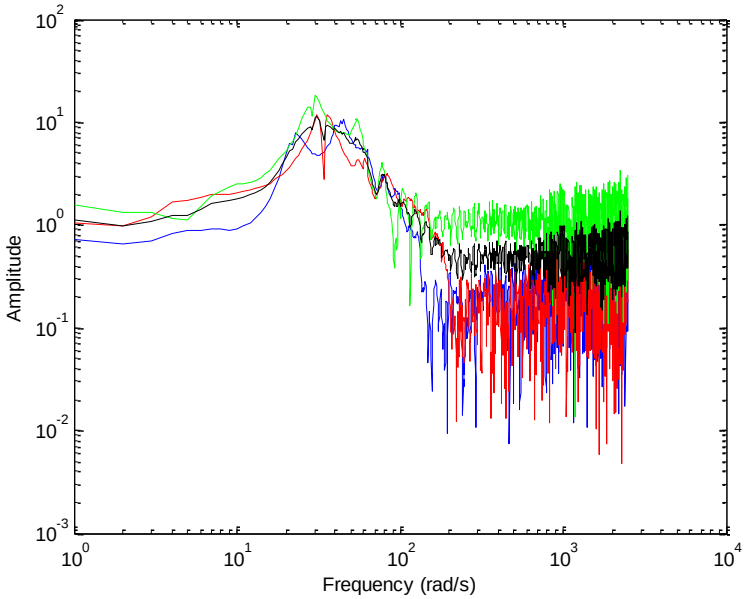
ภาพที่ 52 กราฟแสดงขนาดที่ความถี่ต่างๆ ของผลการตอบสนองเชิงความถี่



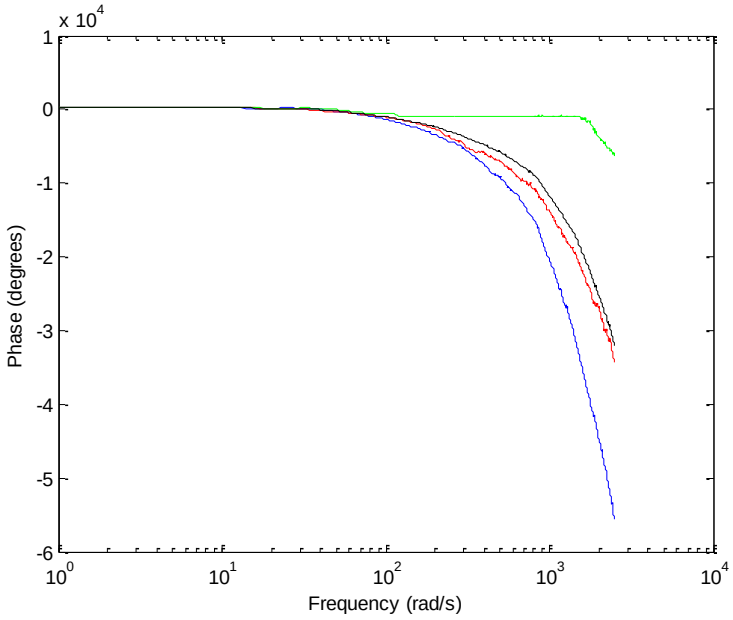
ภาพที่ 53 กราฟแสดงเฟสที่ความถี่ต่างๆ ของผลการตอบสนองเชิงความถี่

4. หาค่าเฉลี่ยของกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ทั้ง 3 ครั้งของผู้ทดสอบแต่ละคน เพื่อให้ได้กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่เพียงชุดเดียวซึ่งสามารถใช้เป็นผลการตอบสนองเชิง

ความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคน โดยกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่นี้จะประกอบด้วยขนาดและเฟสที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงใน ภาพที่ 54 และ 55 ซึ่งกราฟเส้นสีดำคือค่าเฉลี่ยของกราฟเส้นสีน้ำเงิน แดง และเขียว



ภาพที่ 54 กราฟค่าเฉลี่ยขนาดของผลการตอบสนองเชิงความถี่



ภาพที่ 55 กราฟค่าเฉลี่ยเฟสของผลการตอบสนองเชิงความถี่

เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 ของการประมวลผลข้อมูลกับข้อมูลที่ได้จากผู้ทดสอบทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยผู้ทดสอบการจำลองรถยนต์ 33 คนและผู้ทดสอบการจำลองรถสามล้อทั้งหมด 30 คน โดยกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคนจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ง

5. ประมาณกราฟค่าเฉลี่ยของผู้ทดสอบแต่ละคนด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ผลการตอบสนองเชิงความถี่สามารถประมาณกราฟค่าเฉลี่ยนั้นได้ โดยการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนจะพิจารณาข้อมูลเพียงในช่วงความถี่ไม่เกิน 100 rad/s ซึ่งเป็นข้อมูลส่วนที่แสดงเป็นกราฟที่มีความต่อเนื่องและค่าของข้อมูลมีการแกว่งไม่มากนัก ส่วนข้อมูลในส่วนที่ความถี่เกิน 100 rad/s ซึ่งมีค่าของข้อมูลที่มีการแกว่งมากจะไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากการแกว่งของค่าของข้อมูลที่มากนี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมากในการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอน

จากการศึกษาโมเดลแขนของผู้ขับขี่และความรู้ของความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นถ่ายโอนกับลักษณะของกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ สามารถประมาณระบบนี้ด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 2 ดังแสดงในสมการที่ 85 เป็นหลัก ซึ่งต้องพิจารณาตำแหน่งความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงเติมตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า (Lead) หรือตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง (Lag) ดังแสดงในสมการที่ 86 เพื่อให้ผลการตอบสนองเชิงความถี่มีความใกล้เคียงกับกราฟการประมาณมากขึ้น ซึ่งการเติมตัวชดเชยแบบต่างๆ ต้องอาศัยความรู้เรื่องกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่กับตำแหน่งของโพลและซีโร่

$$G(s)=\left(K_1\right)\times\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \tag{85}$$

เมื่อ s คือ ตัวแปรในโดเมนความถี่

K_1 คือ ค่าเกน

ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

ξ คือ ค่าความหน่วง (Damp)

$$G(s)=\left(K_2\right)\times\frac{\left(\frac{1}{f_1}s+1\right)}{\left(\frac{1}{f_2}s+1\right)} \qquad (86)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปรในโดเมนความถี่

K_2 คือ ค่าเกน

f_1 คือ ตำแหน่งความถี่ของซีโร่ (Zero Frequency)

f_2 คือ ตำแหน่งความถี่ของโพล (Pole Frequency)

$f_1 < f_2$ เรียกว่าตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า (Lead)

$f_1 > f_2$ เรียกว่า ตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง (Lag)

โดยเมื่อประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนลักษณะดังกล่าวจะได้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 และลักษณะผลการตอบสนองเชิงความถี่จะได้ดังกราฟเส้นประสีดำซึ่งแสดงในภาพที่ 56

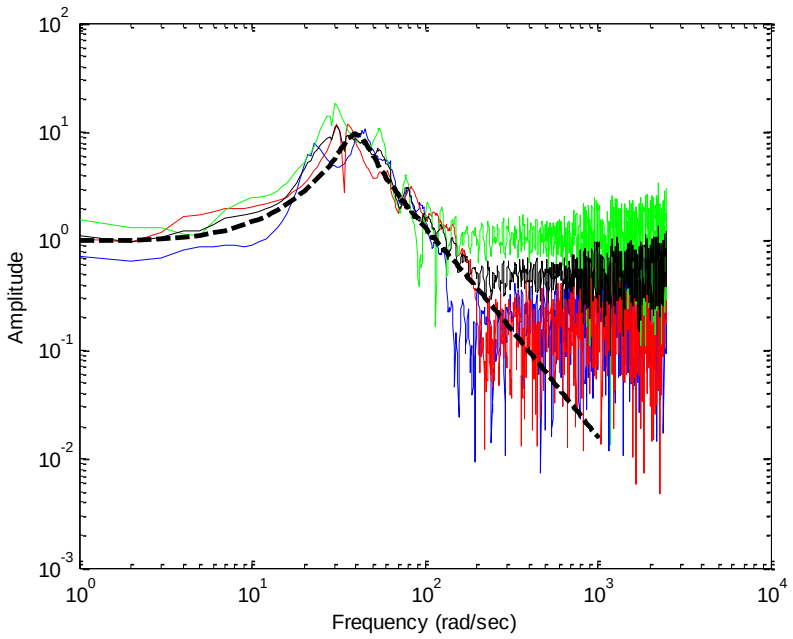
$$G(s)=\left(K\right)\times\frac{\left(\frac{1}{f_1}s+1\right)}{\left(\frac{1}{f_2}s+1\right)}\times\left(\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}\right) \qquad (87)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปรในโดเมนความถี่

K คือ ค่าเกนของระบบ (DC Gain) โดย $K = K_1 \times K_2$

f_1 คือ ตำแหน่งความถี่ของซีโร่ (Zero Frequency)

f_2 คือ ตำแหน่งความถี่ของโพล (Pole Frequency)



ภาพที่ 56 ผลการตอบสนองเชิงความถี่จากการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอน

เมื่อนำกราฟของผู้ทดสอบทั้งหมดมาหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามขั้นตอนที่ 5 ของการประมวลผลข้อมูลแล้ว จะได้กราฟการประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคนดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ง โดยฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ทำการประมาณในงานวิจัยนี้เป็นฟังก์ชั่นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าเป็นมุมการโคลงและสัญญาณออกเป็นมุมการหมุนของพวงมาลัยซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ตามที่แสดงในสมการที่ 76 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นมาจากการสุ่มค่าแล้วพิจารณาแนวโน้มที่ใกล้เคียงที่สุดมาใช้เป็นค่าในฟังก์ชั่นถ่ายโอน ซึ่งการอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมที่ชี้ให้เห็นว่าฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ประมาณขึ้นมีความใกล้เคียงกับระบบจริงและสามารถใช้ได้นั้นจะแสดงในภาคผนวก จ

6. หลังจากได้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ใช้ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่แล้ว จึงนำฟังก์ชั่นถ่ายโอนของผู้ทดสอบแต่ละคนไปเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

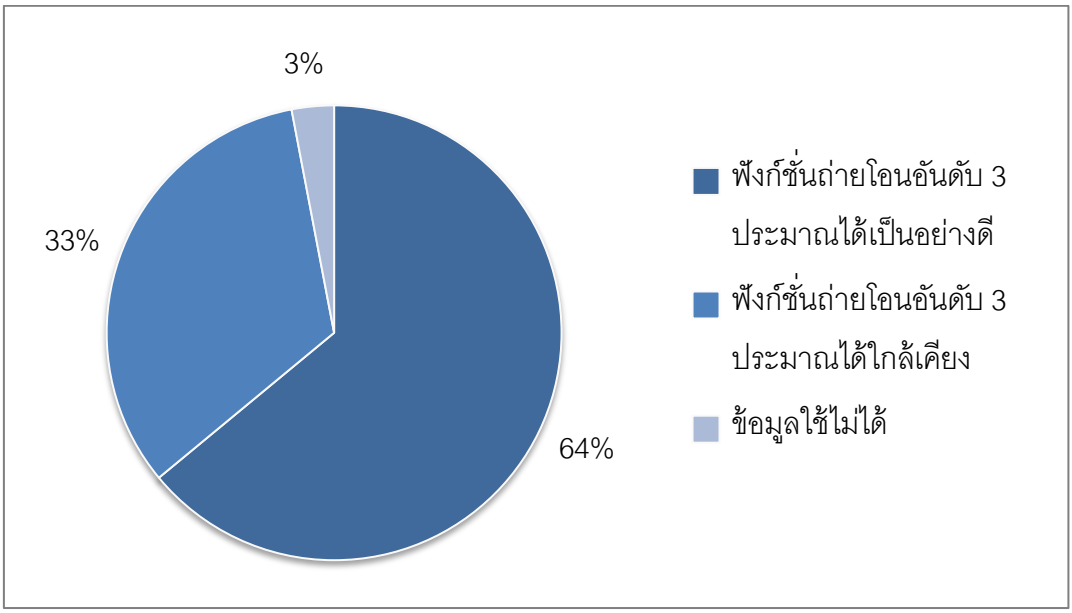
บทที่ 6
อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาฟังก์ชั่นถ่ายโอนและกราฟการประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคนที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในบทที่ 5 พบว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนและแนวโน้มของผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบแต่ละคนนั้นมีความแตกต่างกัน ทั้งลักษณะของฟังก์ชั่นถ่ายโอนและค่าพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าเกน, ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง ดังนั้นในการอภิปรายผลการทดลองจะ นำข้อมูลทั้งหมดนี้มาวิเคราะห์หาความเหมือนและความแตกต่างเพื่อหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมของระบบ โดยแบ่งเป็นส่วนการทดลองจำลองการโคลงของรถยนต์และส่วนการทดลองจำลองการโคลงของรถสามล้อ จากนั้นจึงทำการสรุปผลการทดลองของการจำลองการโคลงทั้งสองแบบดังกล่าว

6.1 อภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถยนต์

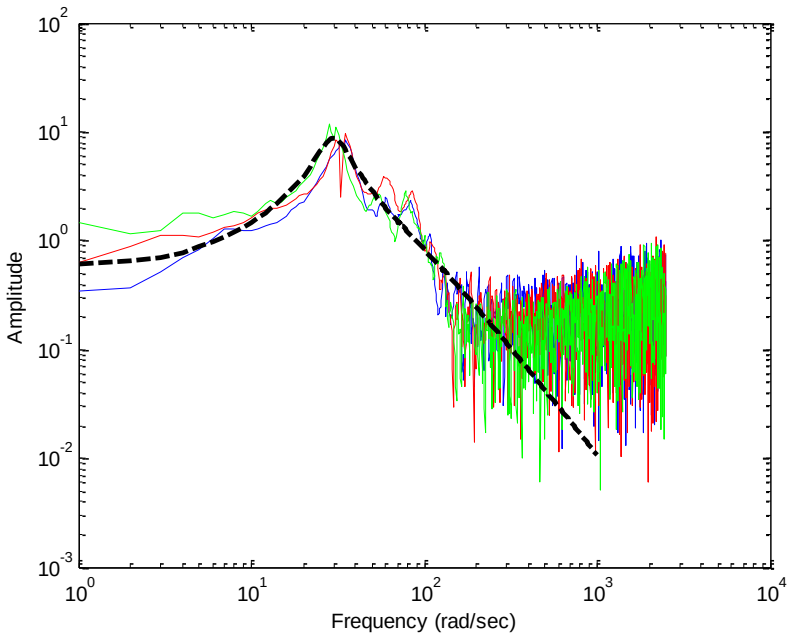
จากการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมของผู้ทดสอบแต่ละคนที่ทำการทดลองด้วยการจำลองการโคลงของรถยนต์พบว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 เหมาะสำหรับใช้เป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามผู้ทดสอบแต่ละคน ซึ่งประกอบด้วย ค่าเกน (DC gain, K), ตำแหน่งความถี่ของซีโร่ (Zero Frequency, f_1), ตำแหน่งความถี่ของโพล (Pole Frequency, f_2), ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency, ω_n) และค่าความหน่วง (Damp, ξ)

เมื่อนำกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมด 33 คนเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวสามารถแบ่งลักษณะการประมาณออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียง และกลุ่มที่ข้อมูลผลการตอบสนองเชิงความถี่ไม่สามารถใช้ได้ ซึ่งทั้ง 3 กลุ่มนี้แบ่งเป็นสัดส่วนได้ดังแสดงในภาพที่ 57

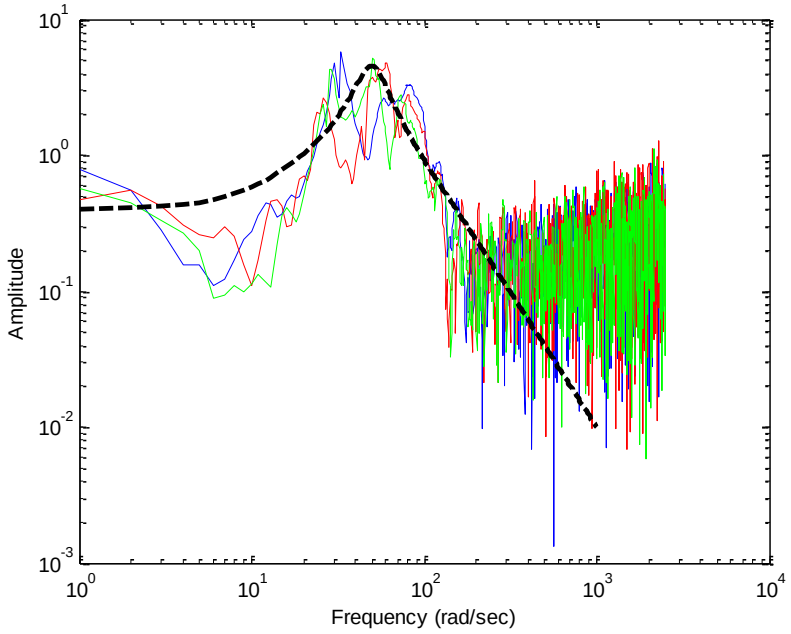


ภาพที่ 57 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลองเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว

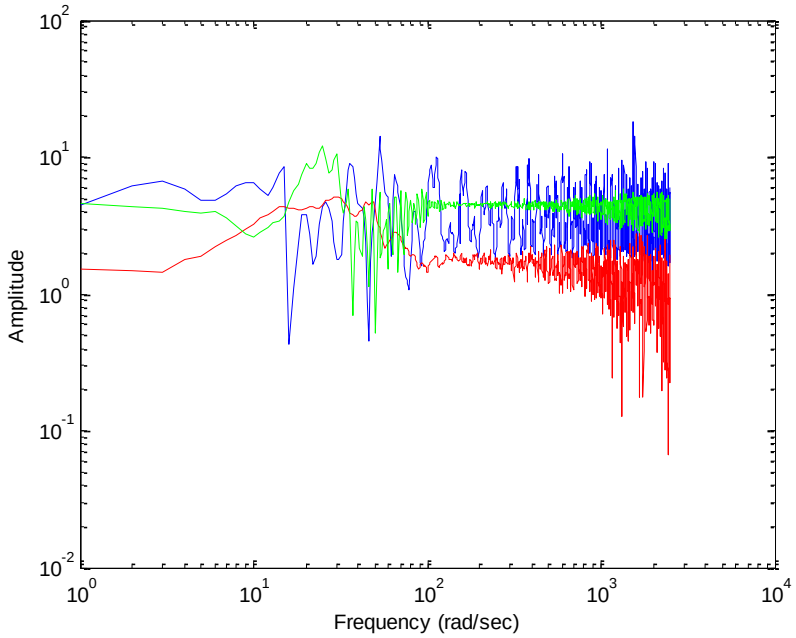
โดยกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี มีทั้งหมด 21 คนคิดเป็น 64 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 58 กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงมีทั้งหมด 11 คนคิดเป็น 33 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 59 ส่วนกลุ่มที่ข้อมูลผลการตอบสนองเชิงความถี่ไม่สามารถใช้ได้มี 1 คนคิดเป็น 3 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 60



ภาพที่ 58 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว



ภาพที่ 59 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง
เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว



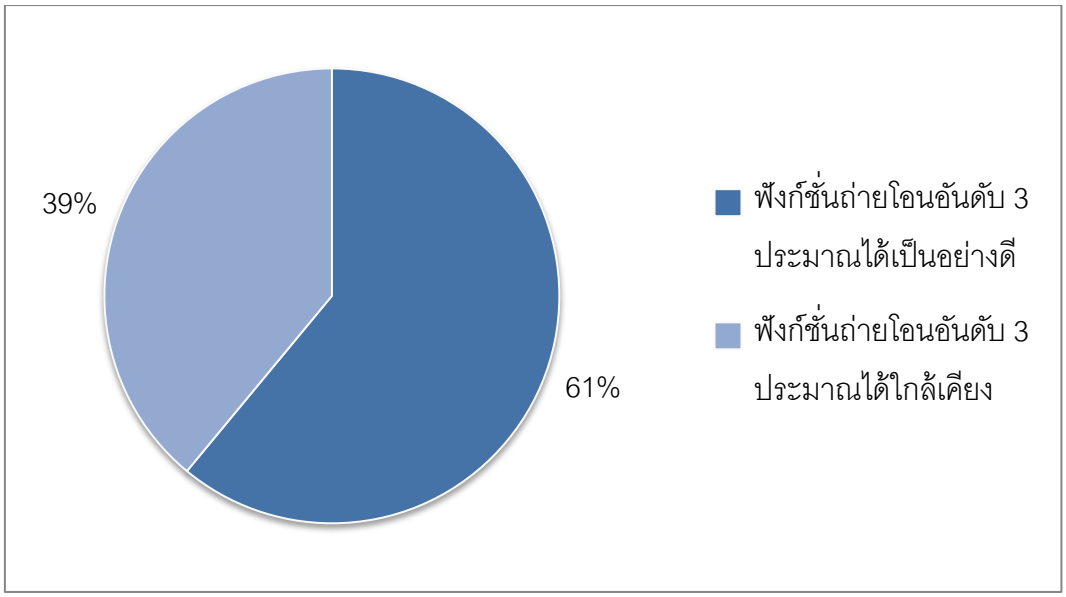
ภาพที่ 60 ลักษณะกราฟที่ข้อมูลผลการตอบสนองเชิงความถี่ไม่สามารถใช้ได้เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว

ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวจะแตกต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ ง 2 ในภาคผนวก ง โดยสามารถหาค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ฐานนิยม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว

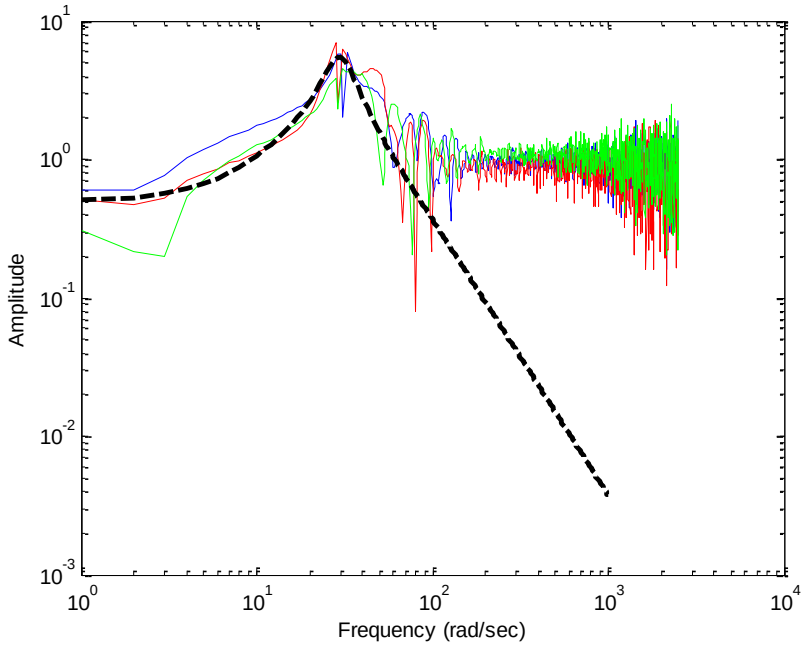
	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
Average	0.69	11.97	105.06	45.63	0.20
Max	5	30	200	70	0.4
Min	0.15	3	2	30	0.1
Mode	0.4	10	100	40	0.2
SD	0.83	6.88	35.73	9.48	0.058

เมื่อนำกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมด 33 คนเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้างสามารถแบ่งลักษณะการประมาณออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี และกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียง ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้แบ่งเป็นสัดส่วนได้ดังแสดงในภาพที่ 61

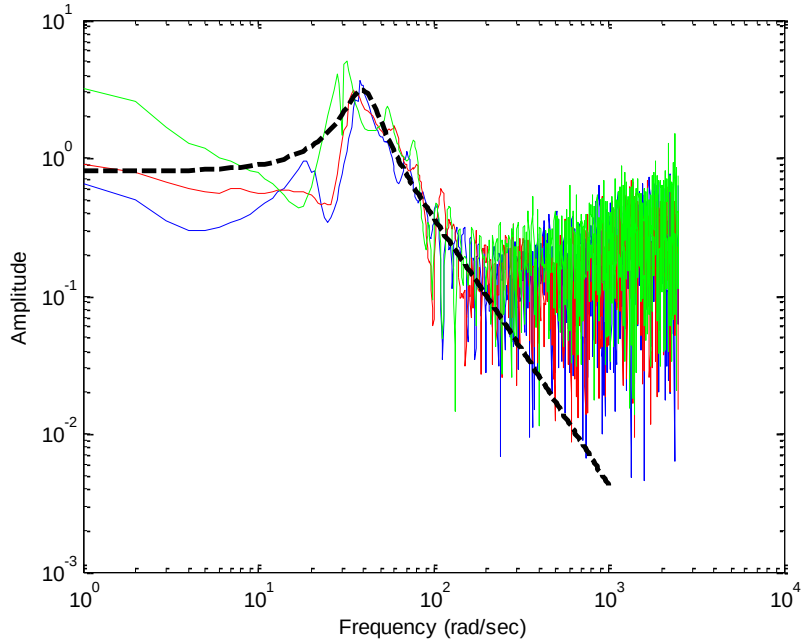


ภาพที่ 61 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลองเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง

โดยกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดีมีทั้งหมด 20 คนคิดเป็น 61 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 62 กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงมีทั้งหมด 13 คนคิดเป็น 39 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 63



ภาพที่ 62 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง



ภาพที่ 63 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง

ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้างแต่ละคนจะมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ ง3 ในภาคผนวก ง โดยสามารถหาค่า ทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่า เฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ฐานนิยม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง

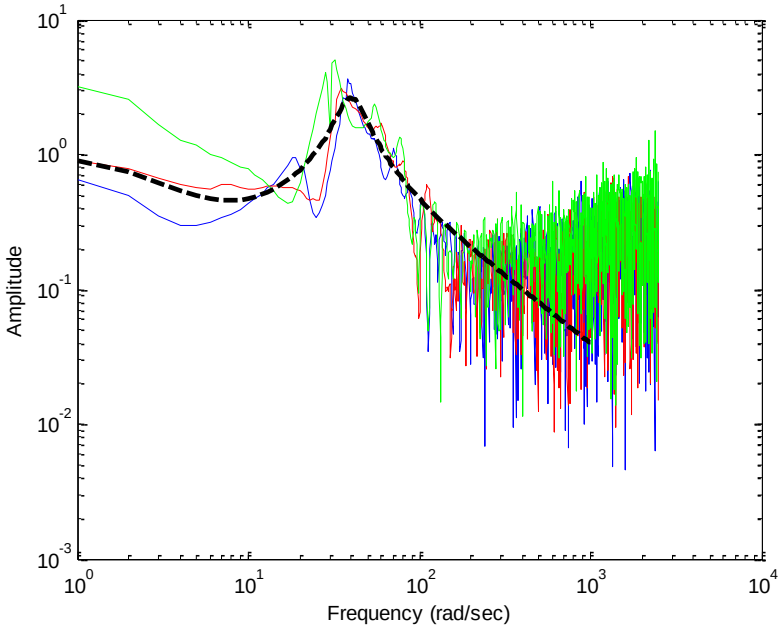
	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
Average	0.47	15.39	98.73	43.33	0.2
Max	1.5	30	300	60	0.3
Min	0.15	4	2	30	0.1
Mode	0.3	20	100	40	0.2
SD	0.34	9.09	62.72	8.90	0.048

จากตารางที่ 5 และ 6 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวกับการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้างมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดทั้งค่าเกนของระบบ ตำแหน่งความถี่ของซีโร่ ตำแหน่งความถี่ของโพล ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง ดังนั้นจึงสรุปว่าเมื่อมีการโคลงของรถยนต์เกิดขึ้นการจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวกับการจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้างไม่ได้ทำให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกัน

ในการทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวและการจับด้วยมือทั้ง 2 ข้าง ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 สามารถใช้ประมาณกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมดได้ โดยลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียงสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้มีความใกล้เคียงมากขึ้นด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังกล่าวและเพิ่มตำแหน่งของซีโร่อีกหนึ่งตำแหน่งดังแสดงในสมการที่ 88

$$G(s)=(K)\times\frac{\left(\frac{1}{f_1}s+1\right)\left(\frac{1}{f_3}s+1\right)}{\left(\frac{1}{f_2}s+1\right)}\times\left(\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}\right) \qquad (88)$$

เมื่อใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ 88 จะได้เส้นการประมาณกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีกว่าเดิมซึ่งแสดงเป็นเส้นประสีดำที่เปลี่ยนจากภาพที่ 63 เป็นภาพที่ 64



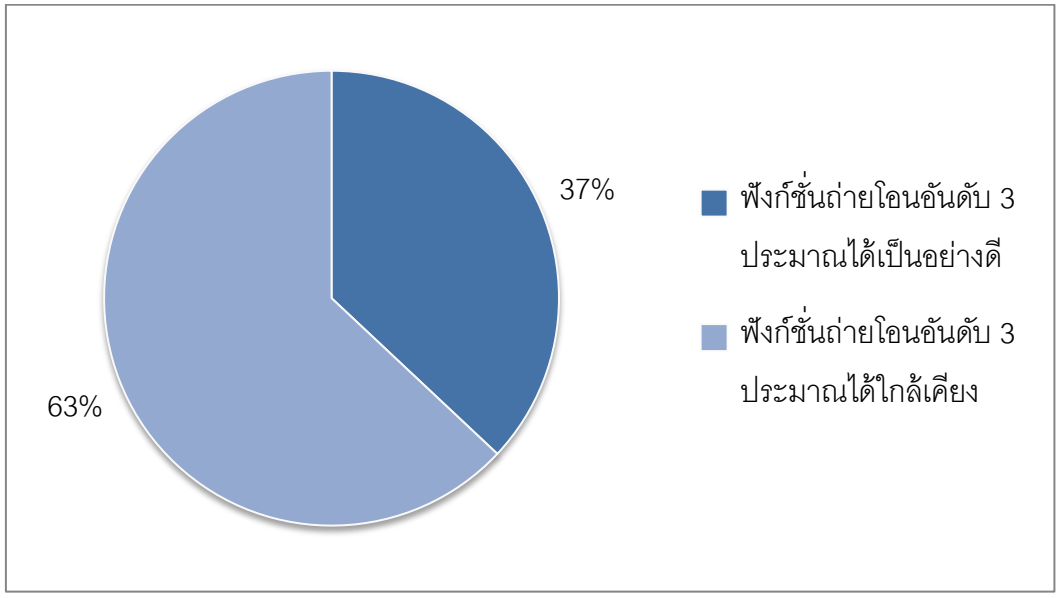
ภาพที่ 64 กราฟการประมาณซึ่งใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ที่ปรับเปลี่ยนใหม่

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟังก์ชั่นถ่ายโอนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถยนต์กับการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่สามารถใช้สมการที่ 87 ในการจำลองระบบของผู้ขับขี่ทั้งหมดได้ ซึ่งส่วนใหญ่ประมาณ 65 เปอร์เซนต์ของผู้ทดสอบทั้งหมดจะสามารถจำลองได้เป็นอย่างดี ส่วนอีก 35 เปอร์เซนต์ของผู้ทดสอบควรปรับมาใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ 88 เพื่อให้การจำลองระบบมีความแม่นยำมากขึ้น

6.2 อภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถสามล้อ

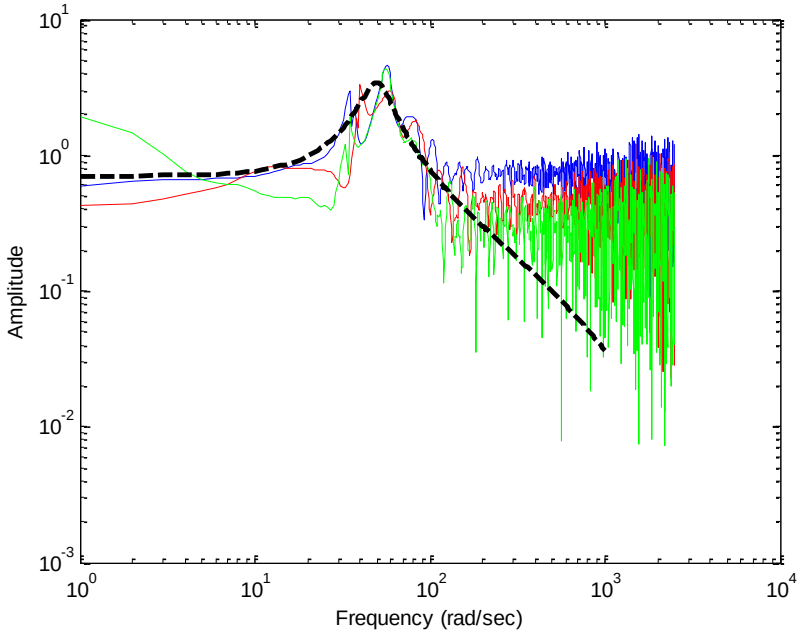
จากการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมของผู้ทดสอบแต่ละคนที่ทำการทดลองด้วยการจำลองการโคลงของรถสามล้อพบว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 เหมาะสำหรับใช้เป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามผู้ทดสอบแต่ละคน ซึ่งประ กอบด้วย ค่าเกน (DC gain, K), ตำแหน่งความถี่ของซีโร่ (Zero Frequency, f_1), ตำแหน่งความถี่ของโพล (Pole Frequency, f_2), ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency, ω_n) และค่าความหน่วง (Damp, ξ)

เมื่อนำกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมด 30 คนเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตรสามารถแบ่งลักษณะการประมาณออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี และกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียง ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้แบ่งเป็นสัดส่วนได้ดังแสดงในภาพที่ 65

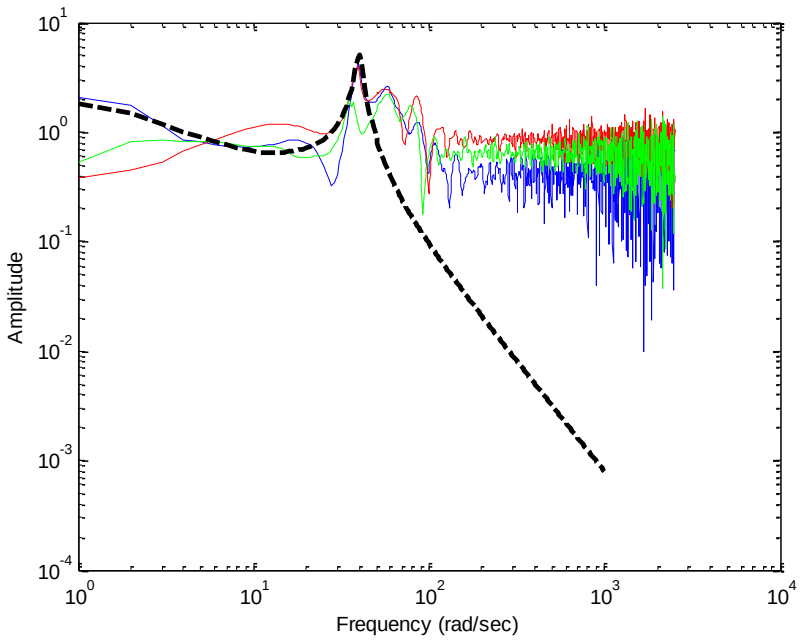


ภาพที่ 65 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลองเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร

โดยกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี มีทั้งหมด 11 คนคิดเป็น 37 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 66 กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงมีทั้งหมด 19 คนคิดเป็น 63 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 66 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร



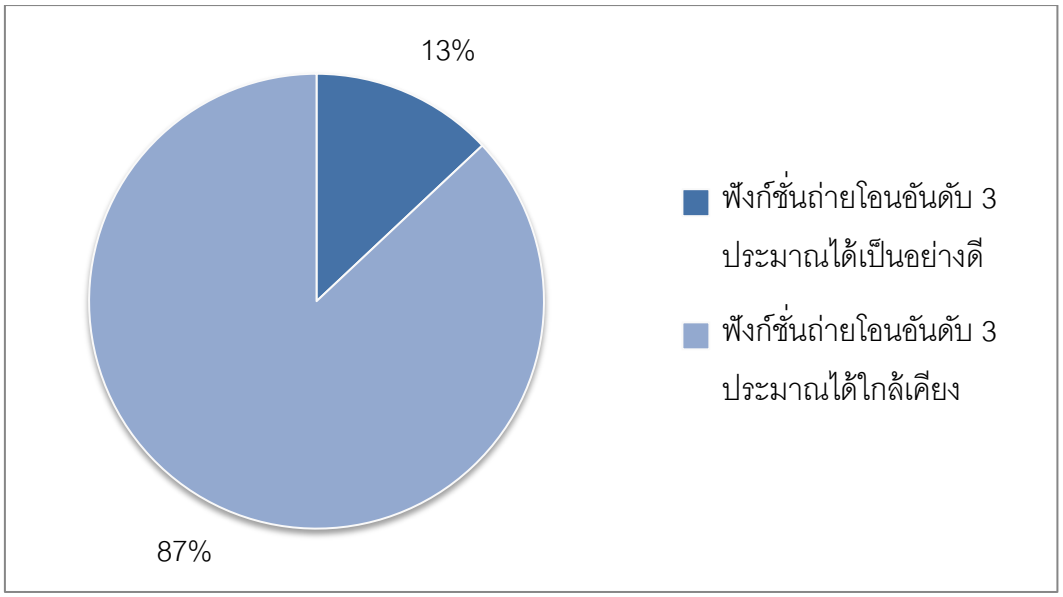
ภาพที่ 67 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียงเมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร

ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตรจะแตกต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ ง5 ในภาคผนวก ง โดยสามารถหาค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ฐานนิยม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร

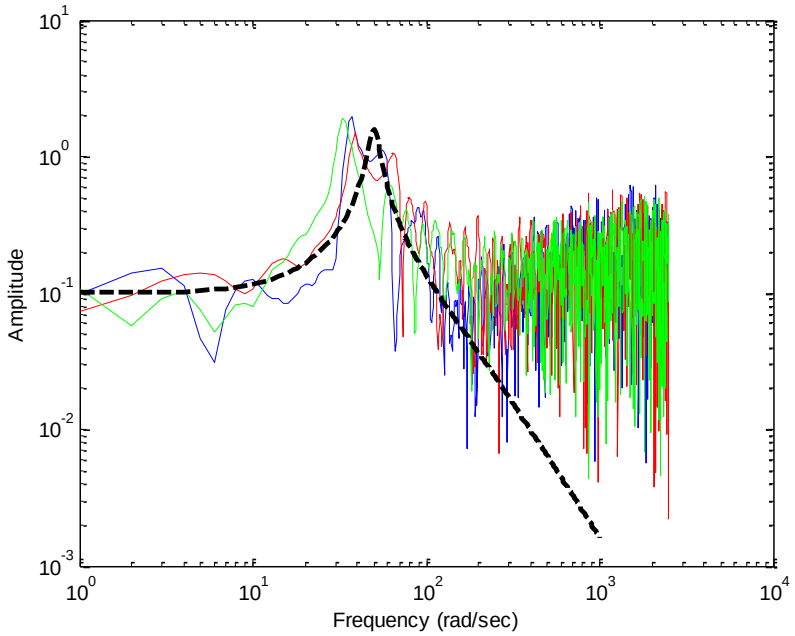
	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
Average	18.43	10.59	56.28	42.53	0.065
Max	500	30	800	70	0.2
Min	0.1	2	0.001	32	0.01
Mode	1	4	1	40	0.1
SD	90.99	8.98	154.98	7.66	0.048

เมื่อนำกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมด 30 คนเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตรสามารถแบ่งลักษณะการประมาณออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดี และกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียง ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้แบ่งเป็นสัดส่วนได้ดังแสดงในภาพที่ 68

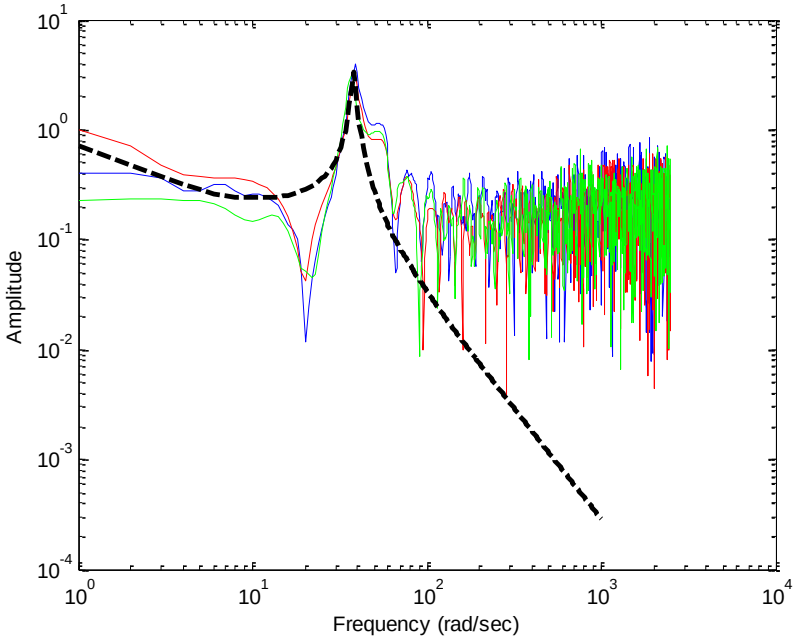


ภาพที่ 68 สัดส่วนลักษณะการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ของการทดลองเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร

โดยกลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้เป็นอย่างดีมีทั้งหมด 4 คนคิดเป็น 13 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 69 กลุ่มที่สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงมีทั้งหมด 26 คนคิดเป็น 87 เปอร์เซนต์ มีลักษณะกราฟการประมาณดังแสดงในภาพที่ 70



ภาพที่ 69 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้เป็นอย่างดี เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร



ภาพที่ 70 ลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียง เมื่อทดสอบด้วยการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร

ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตรแต่ละคนจะมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ ง6 ในภาคผนวก ง โดยสามารถหาค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ฐานนิยม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์เมื่อผู้ทดสอบจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร

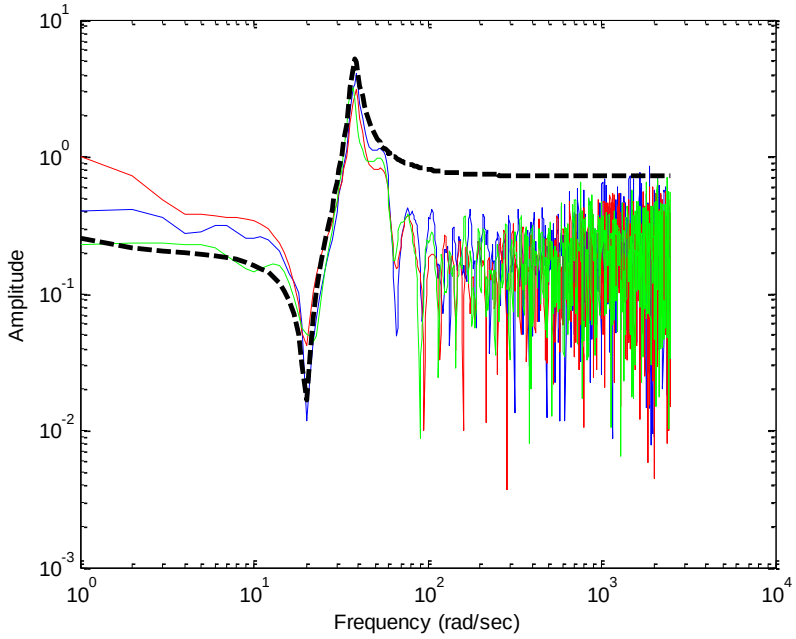
	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
Average	1.44	14.03	46.64	42.43	0.088
Max	10	50	130	60	0.3
Min	0.1	2	0.1	35	0.02
Mode	0.5	4	100	40	0.1
SD	2.14	12.82	51.43	5.78	0.063

จากตารางที่ 7 และ 8 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตรกับห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตรมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดคือค่าเกนของระบบ โดยการจับที่ตำแหน่งใกล้จุดหมุนของพวงมาลัยจะมีค่าเกนของระบบมากกว่าการจับที่ตำแหน่งไกล ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด ทั้งตำแหน่งความถี่ของซีโร่ ตำแหน่งความถี่ของโพล ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง ดังนั้นจึงสรุปว่าเมื่อมีการโคลงของรถสามล้อเกิดขึ้นการจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตรกับห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตรให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกันคือ ค่าเกนของระบบเท่านั้น

ในการทดสอบจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวและการจับด้วยมือทั้ง 2 ข้าง ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 สามารถใช้ประมาณกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบทั้งหมดได้ โดยลักษณะกราฟการประมาณด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ได้ค่อนข้างใกล้เคียงสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้มีความใกล้เคียงมากขึ้นด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังกล่าวและเพิ่มตำแหน่งของซีโร่อีกหนึ่งตำแหน่งดังแสดงในสมการที่ 89

$$G(s)=(K)\times\frac{\left(\frac{1}{f_1}s+1\right)\left(\frac{\omega_{n2}^2}{s^2+2\xi_2\omega_{n2}s+\omega_{n2}^2}\right)}{\left(\frac{1}{f_2}s+1\right)}\times\left(\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}\right) \quad (89)$$

เมื่อใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ 89 จะได้เส้นการประมาณกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีกว่าเดิมซึ่งแสดงเป็นเส้นประสีดำที่เปลี่ยนจากภาพที่ 70 เป็นภาพที่ 71



ภาพที่ 71 กราฟการประมาณซึ่งใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 กับซีโร่อันดับ 2

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟังก์ชั่นถ่ายโอนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถยนต์กับการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่สามารถใช้สมการที่ 87 ในการจำลองระบบของผู้ขับขี่ได้เพียงบางส่วนซึ่งเป็นเพียง 25 เปอร์เซนต์ของผู้ทดสอบทั้งหมด ส่วนผู้ทดสอบประมาณ 75 เปอร์เซนต์ของผู้ทดสอบทั้งหมดควรปรับมาใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังสมการที่ 89 เพื่อให้การจำลองระบบมีความแม่นยำมากขึ้น

6.3 สรุปผลการทดลอง

จากการอภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถยนต์จึงสามารถสรุปได้ว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมสำหรับใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับมุมการหมุนของพวงมาลัยได้เป็นส่วนใหญ่คือ ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 ซึ่งผู้ทดสอบประมาณ 65 เปอร์เซนต์สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้ประมาณได้อย่างแม่นยำ และส่วน 35 เปอร์เซนต์ที่เหลือที่ควรใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 88 หากต้องการให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบมีความแม่นยำ จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในฟังก์ชั่นถ่ายโอนจึงสรุปว่าเมื่อมีการจำลองการโคลงของรถยนต์การจับพวงมาลัยในลักษณะที่แตกต่างกันคือ การจับด้วยมือขวาข้างเดียว และการจับด้วยมือทั้ง 2 ข้าง ไม่ให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกัน

จากการอภิปรายผลการทดลองที่จำลองการโคลงของรถสามล้อสามารถสรุปได้ว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 ยังไม่เหมาะสมสำหรับใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับมุมการหมุนของพวงมาลัย เนื่องจากสามารถใช้ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบประมาณ 25 เปอร์เซนต์ของจำนวนผู้ทดสอบทั้งหมดเท่านั้น และส่วน 75 เปอร์เซนต์ซึ่งเป็นส่วนมากควรใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 89 หากต้องการให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบมีความแม่นยำ จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในฟังก์ชั่นถ่ายโอนจึงสรุปว่าเมื่อมีการจำลองการโคลงของรถสามล้อการจับพวงมาลัยในลักษณะที่แตกต่างกันคือ การจับพวงมาลัยตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร และห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร ให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกันเพราะมีค่าเกนของระบบที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 7
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

จากการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์สำหรับใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ดังมีรายละเอียดตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 สามารถสรุปผลการออกแบบและพัฒนาได้ดังนี้ ขั้นตอนแรกของการออกแบบและพัฒนาจำเป็นต้องศึกษาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีการใช้ในปัจจุบัน ศึกษาวิธีการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ รวมทั้งศึกษาถึงระบบการรับรู้ของมนุษย์มาประกอบการออกแบบด้วย จากนั้นในการออกแบบต้องตั้งวัตถุประสงค์ของการออกแบบ และออกแบบให้มีความหลากหลาย เพื่อนำแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาแบบที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้แบบที่ต้องการแล้วจึงนำมาสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และโมเดลการจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อหาตำแหน่งข้อต่อและความยาวของโครงสร้างแต่ละส่วนที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ที่ต้องการ แล้วจึงนำแบบที่ทำส่งไปสร้างโครงสร้างจริง

สรุปผลที่ได้จากการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์คือ โครงสร้างจริงของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ดังแสดงในภาพที่ 23 ซึ่งมีพื้นที่การใช้งานตามที่แสดงในภาพที่ 24

7.2 สรุปผลการศึกษาพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ขณะรถยนต์เกิดการโคลง

จากการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการโคลงของรถยนต์กับพฤติกรรมการบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่พบว่า สำหรับการจำลองการโคลงของรถยนต์สามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่เหมาะสมสำหรับใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับมุมการหมุนของพวงมาลัยได้เป็นส่วนใหญ่คือ ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 ซึ่งผู้ทดสอบประมาณ 65 เปอร์เซนต์สามารถใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้ประมาณได้อย่างแม่นยำ และส่วน 35

เปอร์เซนต์ที่เหลือที่ควรใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 88 หากต้องการให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบมีความแม่นยำ โดยมีค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในฟังก์ชั่นถ่ายโอนจึงสรุปว่าเมื่อมีการจำลองการโคลงของรถยนต์การจับพวงมาลัยในลักษณะที่แตกต่างกันคือ การจับด้วยมือขวาข้างเดียว และการจับด้วยมือทั้ง 2 ข้าง ไม่ให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกัน

สำหรับการจำลองการโคลงของรถสามล้อสามารถสรุปได้ว่า ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 87 ยังไม่เหมาะสมสำหรับใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการโคลงของรถยนต์กับมุมการหมุนของพวงมาลัย เนื่องจากสามารถใช้ ประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ของผู้ทดสอบประมาณ 25 เปอร์เซนต์ของจำนวนผู้ทดสอบทั้งหมดเท่านั้น และส่วน 75 เปอร์เซนต์ซึ่งเป็นส่วนมากควรใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3 ดังแสดงในสมการที่ 89 หากต้องการให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบมีความแม่นยำ โดยมีค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในฟังก์ชั่นถ่ายโอนจึงสรุปว่าเมื่อมีการจำลองการโคลงของรถสามล้อการจับพวงมาลัยในลักษณะที่แตกต่างกันคือ การจับพวงมาลัยตำแหน่งห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร และห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร ให้ผลการบังคับเลี้ยวที่แตกต่างกันเพราะมีค่าเกนของระบบที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

7.3 **ข้อเสนอแนะ**

เนื่องจากการประมาณด้วยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทำให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ทำการประมาณนั้นมีความแม่นยำไม่สูงมากนัก ดังนั้น การเพิ่มความแม่นยำในการประมาณสามารถใช้คำสั่ง lsqcurvefit หรือ invfreqs ซึ่งเป็นคำสั่งสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้สำหรับประมาณค่าของฟังก์ชั่นลักษณะต่างๆ แต่การใช้คำสั่งนี้จำเป็นต้องได้ข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่มีความต่อเนื่องและมีการแกว่งของค่าที่เวลาต่างๆ จึงจะทำให้การใช้คำสั่งนี้ได้ผลที่ดีที่สุด

รายการอ้างอิง

(1) Thomas D. Gillespie. Fundamentals of Vehicle Dynamics. ISBN: 1-56091-199-9, Society of Automotive Engineers.

(2) เด่น จันทร์ทองอ่อน และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ . A Design of 3 DOF Driving Simulator. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมยานยนต์ครั้งที่ 3, 2 เมษายน 2550.

(3) David, W. Force Dynamics motion simulator [Online]. 2007. Available from: http://www.force-dynamics.com [2010,July 20]

(4) Nuksit Noomwongs, Rachatin Chanchareon, Supavut Chantranuwathana, and Witaya Wannasuphoprasit. Development of Novel Evaluation Systems for Vehicle Dynamics, Driving, and Components. 2006

(5) Prabjot Nanua, Kenneth J, Waldron and Vasudeva Murthy. Direct Kinematic Solution of a Stewart platform. IEEE Transactions on robotics and automation, 438 - 444. 1990.

(6) Ping Ji and Hongtao. Kinematics analysis of an offset 3- UPU translational parallel robotic manipulator. Robotic and Autonomous system, 117-123. 2003.

(7) Gregory, J.H., and Sanderson, A.C. A Novel Concentric MultilinkSpherical Joint with Parallel Robotics Applications. IEEE Transactions on robotics and automation, 1267-1272. 1994.

(8) Andy R. W. Huang and Chihsiuh Chen. A Low cost driving Simulator for Full Vehicle Dynamics Simulation. IEEE Transactions on vehicular technology, 162 - 172. 2003.

(9) ราตรี สุดทรวง และ วีระชัย สิงหนิยม. ประสาทสรีรวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

(10) Nervous structure [Online]. Available from: http://www.encognitive.com/node/1115 [2009, September 22]

(11) Clark, B., and Stewart, J. D. Thresholds for the Perception of Angular Acceleration about the Three Major Body Axes. Acta Otolaryng 69, 231-238. 1970.

(12) J. J. Goren and L. B. W. Jongkees. The Threshold of Angular Acceleration Perception. The Clinic for Ear, Nose and Throat Diseases, University of Utrecht, 1964.

(13) A J Pick and D J Cole. Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007.

(14) F. Dettki. A Testing Method for the Quantification of on-centre Handling with respect to cross wind. DaimlerChrysler AG, Vehicle Dynamics, Development Passenger Cars.

(15) B. Mashadi and D. A. Crolla. Influence of ride motions on the handling behaviour of a passenger vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005.

(16) Jun Nakagawa, Miki Tanaka, and Ken-ichi Yoshimoto. Modelling of a driver's behavior considering roll motion. Proceedings of the JSAE Conference, 35 – 43. 1994.

(17) Mark, B. Motion simulator platform [Online]. 2004. Available from: http://www.inmotionsimulation.com [2010, July 22]

(18) Moog. Motion simulator platform [Online]. 2010. Available from: http://www.moog.com [2010, July 22]

(19) Simuline. Motion simulator platform [Online]. 2009. Available from: http://www.simuline.com [2010, July 25]

(20) ชนพล พัวพัฒนกุล , ชลยุทธ อ่องมณี , ชาญวิทย์ วุฒิเลิศอนันต์ และกมลชนก ทรัพย์สามารถ. การออกแบบและสร้างเครื่องจำลองการขับขี่ยานยนต์แบบ 2 ระดับขั้นเสรี, โครงงานหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเรือและวิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

(21) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ . การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

(22) วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี [Online]. Available from: http://th.wikipedia.org/wiki/ทฤษฎีระบบควบคุม#.E0.B8.9F.E0.B8.B1.E0.B8.87.E0.B8.81.E0.B9.8C.E0.B8.8A.E0.B8.B1.E0.B8.99.E0.B8.AA.E0.B9.88.E0.B8.87.E0.B8.9C.E0.B9.88.E0.B8.B2.E0.B8.99.E0.B8.82.E0.B8.AD.E0.B8.87.E0.B8.A3.E0.B8.B0.E0.B8.9A.E0.B8.9A.E0.B8.A7.E0.B8.87.E0.B8.9B.E0.B8.B4.E0.B8.94 [2011, January 30]

(23) นวภัค เอื้ออนันต. การแปลงฟูเรียร์และการประยุกต์ใช้งาน [Online]. Available from: http://www.scribd.com/doc/61573494/Chapter5-Fourier [2012, February 5]

(24) Ronald N. Bracewell. Fourier Transforms [Online]. Available from: http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/FourierTransforms.html [2012, February 5]

(25) Andrew James Pick. Neuromuscular Dynamics and the Vehicle Steering Tasks. Doctoral dissertation, The University of Cambridge, 2004.

(26) Tom Pilutti and A. Galip Ulsoy. Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks. IEEE Transactions on system, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 29, No. 5, September 1999.

(27) Saeed B. Niku. Introduction to Robotics Analysis, Control, Application. Second edition. John Wiley & Sons, 2010.

(28) Gefran. Specification Data of Potentiometer [Online]. Available from: http://www.gefran.com/en/products/product_532.aspx [2012, January 10]

(29) Hohner automaticos S.L. Specification Data of Encoder [Online]. Available from: http://www.hohner.es [2011, December 20]

(30) National Instrument Thailand. Specification Data of NI CompactRIO [Online]. Available from: http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/203964 [2012, January 10]

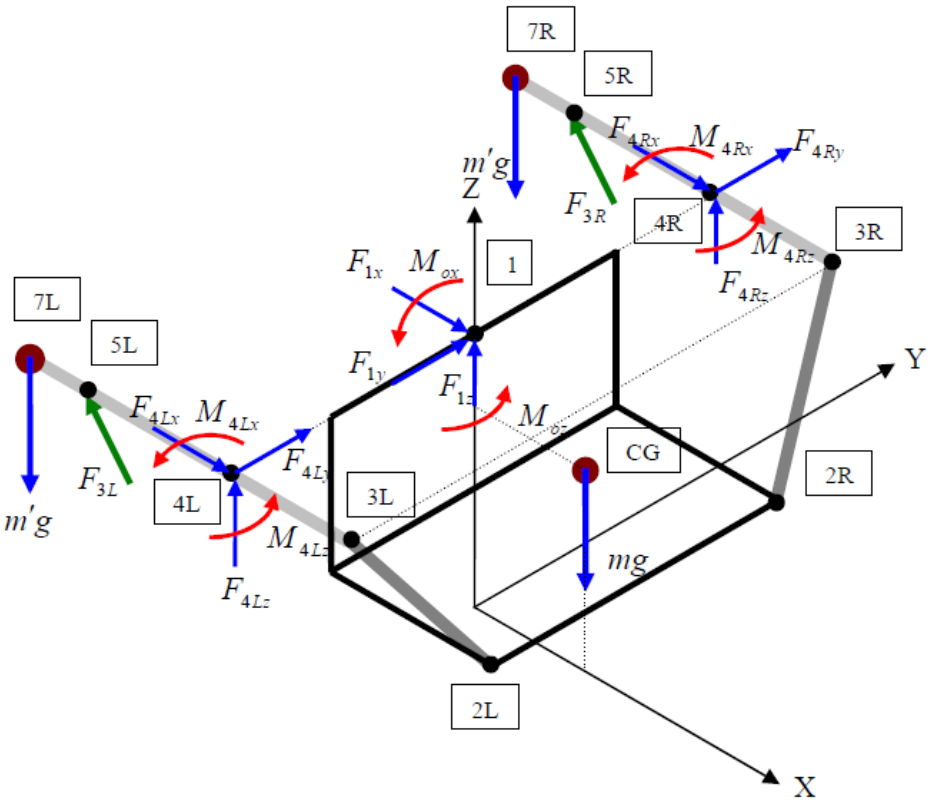
(31) Copley Controls. Specification Data of Accelus [Online]. Available from: http://www.copleycontrols.com/motion/Products/Drives/Digital/accelus.html [2012, January 10]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณแรงที่กระทำบนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์

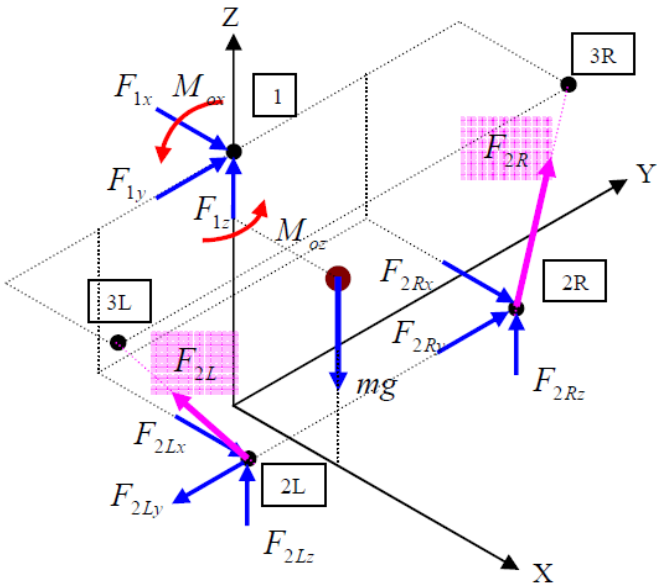
การคำนวณแรงที่กระทำบนโครงสร้างของระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่มีการ ได้แก่ ที่นั่งคนขับ แขนหมายเลข 2 และแขนหมายเลข 3 พบว่าโครงสร้างเหล่านี้มีโมเมนต์และแรงกระทำที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ ข้อต่อเหนือศีรษะ จุดหมุนของแขนหมายเลข 3 และโครงสร้างที่นั่งซึ่งมีน้ำหนักผู้ขับขี่กระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (Center of Gravity) ดังแสดงในภาพที่ ก1 ในการคำนวณการเคลื่อนที่ด้วยวิธีทางพลศาสตร์ (Dynamics) จะมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นการใช้วิธีทางสถิตยศาสตร์ (Statics) จึงช่วยให้ง่ายต่อการคำนวณมากขึ้น โดยมีการเพิ่มตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) เพื่อป้องกันการเกิดแรงจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (19)



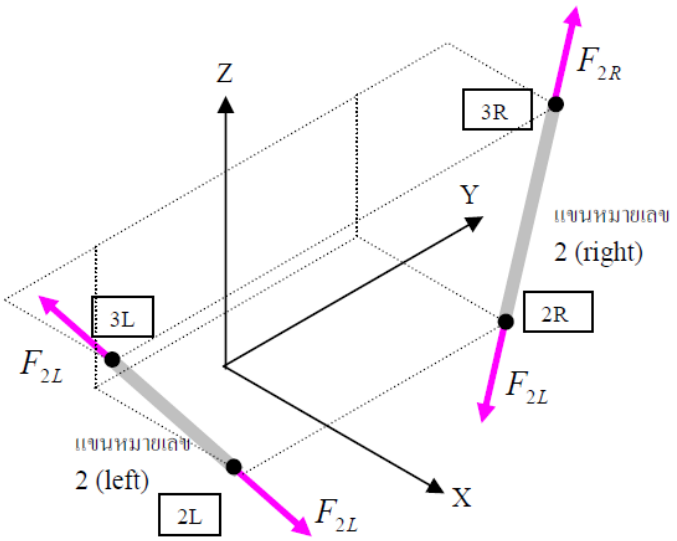
ภาพที่ ก1 Free Body Diagram ซึ่งแสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างขณะอยู่ในภาวะสมดุล

การสร้างสมการจะพิจารณาฟรีบอดี้ไดอะแกรม (Free Body Diagram) ซึ่งแสดงแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างส่วนต่างๆ ขณะอยู่ในภาวะสมดุล จาก ภาพที่ ก1 ประกอบด้วยแรงและโมเมนต์ที่กระทำที่ข้อต่อต่างๆ ได้แก่ ข้อต่อเหนือศีรษะ แทน ด้วยตำแหน่ง 1 จุดหมุนของแขนหมายเลข 3 ด้านซ้ายและด้านขวา แทนด้วยตำแหน่ง 4L และ 4R ตามลำดับ ข้อต่อระหว่างอุปกรณ์ขับเชิงเส้นกับแขนหมายเลข 3 แทนด้วยตำแหน่ง 5L และ 5R ตามลำดับ ส่วนตำแหน่ง 7L และ 7R เป็นตำแหน่งยึดมวลถ่วงเพื่อช่วยในการออกแรงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นซึ่งรูปแบบระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ที่พัฒนาแล้วไม่มีการใช้มวลถ่วง ดังนั้นการคำนวณจึงแทนค่า m' เท่ากับศูนย์ในสมการ นอกจากนี้ยังมีแรงจากมวลรวมของโครงสร้างที่นั่งและน้ำหนักผู้ขับขี่กระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของโครงสร้างที่นั่งซึ่งแทนด้วยตำแหน่ง CG

พิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำบนโครงสร้างที่นั่งจากฟรีบอดี้ไดอะแกรมดังแสดงในภาพที่ ก2 จะเห็นว่ามีแรงจากแขนหมายเลข 2 ซึ่งแทนด้วย F_{2L} และ F_{2R} กระทำที่ตำแหน่ง 2L และ 2R ตามลำดับ โดยแรงนี้เป็นทูฟอร์สเมมเบอ ร์ (Two-Force Member) ดังแสดงในภาพที่ ก3 จึงมีทิศทางชี้ในแนวการวางตัวของแขนหมายเลข 2 คือชี้จากตำแหน่ง 2L ไปยัง 3L และจากตำแหน่ง 2R ไปยัง 3R ตามลำดับ

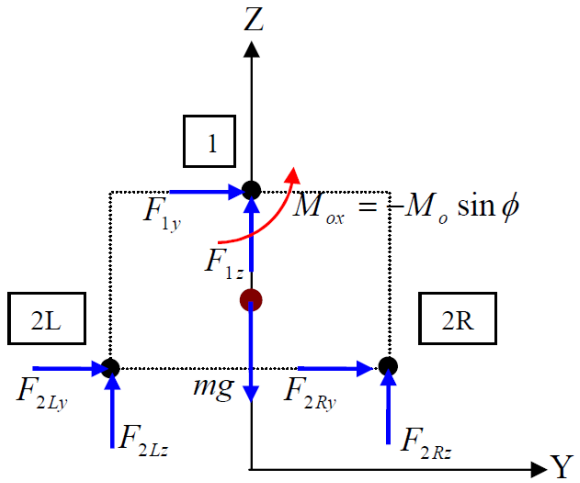


ภาพที่ ก2 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่ง



ภาพที่ ก3 แรงจากแขนหมายเลข 2 มีลักษณะเป็น Two-Force Member

พิจารณาโครงสร้างที่นั่งในระนาบ Y-Z ดังแสดงในภาพที่ ก4 คำนวณสมดุลของโมเมนต์ในแนวแกน X ที่ตำแหน่งข้อต่อเหนือศีรษะหรือข้อต่อ 1 ทำให้ได้สมการที่ ก1 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ ก4 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ Y-Z

$$\sum M_{x'} = 0$$

$$(y_{2L} - y_1)\hat{j} \times (F_{2Lz})\hat{k} + (z_{2L} - z_1)\hat{k} \times (F_{2Ly})\hat{j} + (y_{2R} - y_1)\hat{j} \times (F_{2Rz})\hat{k} + (z_{2R} - z_1)\hat{k} \times (F_{2Ry})\hat{j} + y'_{CG}\hat{j} \times (-mg)\hat{k} - M_o \sin\phi = 0$$

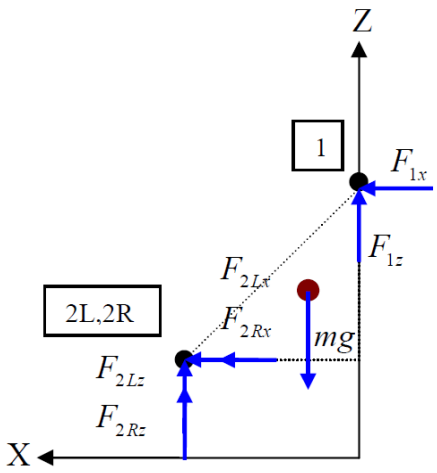
$$(y_{2L} - y_1)(F_{2Lz}) - (z_{2L} - z_1)(F_{2Ly}) + (y_{2R} - y_1)(F_{2Rz}) - (z_{2R} - z_1)(F_{2Ry}) - mgy'_{CG} - M_o \sin\phi = 0$$

$$(y_{2L} - 0)(F_{2L}|\hat{z}_{23L}|) - (z_{2L} - H)(F_{2L}|\hat{y}_{23L}|) + (y_{2R} - 0)(F_{2R}|\hat{z}_{23R}|) - (z_{2R} - H)(F_{2R}|\hat{y}_{23R}|) - mgy'_{CG} - M_o \sin\phi = 0$$

$$F_{2L}\left[y_{2L}|\hat{z}_{23L}| - z_{2L}|\hat{y}_{23L}| + H|\hat{y}_{23L}|\right] + F_{2R}\left[y_{2R}|\hat{z}_{23R}| - z_{2R}|\hat{y}_{23R}| + H|\hat{y}_{23R}|\right] - mgy'_{CG} - M_o \sin\phi = 0$$

$$F_{2L}K + F_{2R}J - N - M_o \sin\phi = 0 \qquad \text{(ก1)}$$

พิจารณาโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Z ดังแสดงในภาพที่ ก5 คำนวณสมดุลของโมเมนต์ในแนวแกน Y ที่ตำแหน่งข้อต่อเหนือศีรษะหรือข้อต่อ 1 ทำให้ได้สมการที่ ก2 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ ก5 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Z

$$\sum M_{y'} = 0$$

$$(x_{2L} - x_1)\hat{i} \times (F_{2Lz})\hat{k} + (z_{2L} - z_1)\hat{k} \times (F_{2Lx})\hat{i} + (x_{2R} - x_1)\hat{i} \times (F_{2Rz})\hat{k} + (z_{2R} - z_1)\hat{k} \times (F_{2Rx})\hat{i} + x'_{CG}\hat{i} \times (-mg)\hat{k} = 0$$

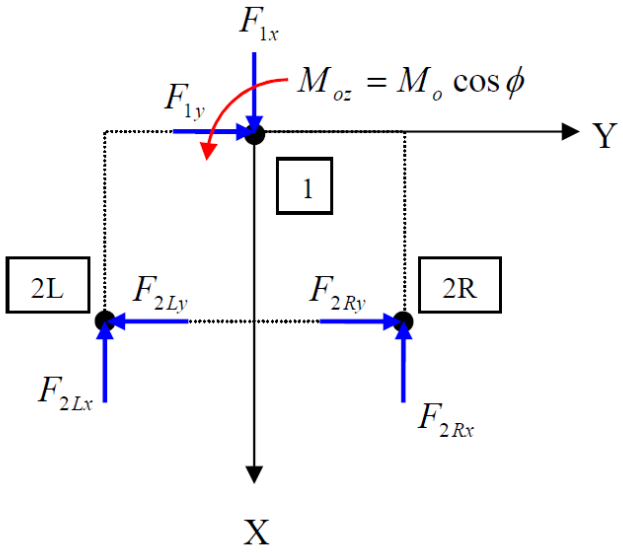
$$-(x_{2L} - x_1)(F_{2Lz}) + (z_{2L} - z_1)(F_{2Lx}) - (x_{2R} - x_1)(F_{2Rz}) + (z_{2R} - z_1)(F_{2Rx}) + mgx'_{CG} = 0$$

$$-(x_{2L}-0)(F_{2L}|\hat{z}_{23L}|)+(z_{2L}-H)(F_{2L}|\hat{x}_{23L}|)-(x_{2R}-0)(F_{2R}|\hat{z}_{23R}|)+(z_{2R}-H)(F_{2R}|\hat{x}_{23R}|)+mgx'_{CG}=0$$

$$F_{2L}\left[-x_{2L}|\hat{z}_{23L}|+z_{2L}|\hat{x}_{23L}|-H|\hat{x}_{23L}|\right]+F_{2R}\left[-x_{2R}|\hat{z}_{23R}|+z_{2R}|\hat{x}_{23R}|-H|\hat{x}_{23R}|\right]+mgx'_{CG}=0$$

$$F_{2L}G+F_{2R}E+I=0 \qquad (ก2)$$

พิจารณาโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Y ดังแสดงในภาพที่ ก6 คำนวณสมดุลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ที่ตำแหน่งข้อต่อเหนือศีรษะหรือข้อต่อ 1 ทำให้ได้สมการที่ ก3 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ ก6 Free Body Diagram ของโครงสร้างที่นั่งในระนาบ X-Y

$$\sum M_{z'}=0$$

$$(x_{2L}-x_1)\hat{i}\times(F_{2Ly})\hat{j}+(y_{2L}-y_1)\hat{j}\times(F_{2Lx})\hat{i}+(x_{2R}-x_1)\hat{i}\times(F_{2Ry})\hat{j}+(y_{2R}-y_1)\hat{j}\times(F_{2Rx})\hat{i}+M_o\cos\phi=0$$

$$(x_{2L}-x_1)(F_{2Ly})-(y_{2L}-y_1)(F_{2Lx})+(x_{2R}-x_1)(F_{2Ry})-(y_{2R}-y_1)(F_{2Rx})+M_o\cos\phi=0$$

$$(x_{2L}-0)(F_{2L}|\hat{y}_{23L}|)-(y_{2L}-0)(F_{2L}|\hat{x}_{23L}|)+(x_{2R}-0)(F_{2R}|\hat{y}_{23R}|)-(y_{2R}-0)(F_{2R}|\hat{x}_{23R}|)+M_o\cos\phi=0$$

$$F_{2L}\left[x_{2L}|\hat{y}_{23L}|+y_{2L}|\hat{x}_{23L}|\right]+F_{2R}\left[x_{2R}|\hat{y}_{23R}|-y_{2R}|\hat{x}_{23R}|\right]+M_o\cos\phi=0$$

$$F_{2L}P+F_{2R}O+M_o\cos\phi=0 \qquad (ก3)$$

จัดรูปสมการที่ ก2 ใหม่จะได้สมการที่ ก4

$$F_{2R} = \frac{-\left(mgx'_{CG} + GF_{2L}\right)}{E} \qquad (ก4)$$

แทนสมการที่ ก4 ลงในสมการที่ ก1 แล้วจัดรูปใหม่จะได้สมการที่ ก5 โดยมีขั้นตอนดังนี้

$$F_{2L}K - \frac{\left(mgx'_{CG} + GF_{2L}\right)J}{E} - mgy'_{CG} - M_o \sin\phi = 0$$

$$F_{2L}K - \frac{Jmgx'_{CG}}{E} - \frac{GF_{2L}J}{E} - mgy'_{CG} - M_o \sin\phi = 0$$

$$F_{2L}\left(K - \frac{GJ}{E}\right) = N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}$$

$$F_{2L} = \frac{N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}}{K - \frac{GJ}{E}}$$

$$F_{2L} = \frac{E\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ} \qquad (ก5)$$

แทนค่าสมการที่ ก4 และ ก5 ลงในสมการที่ ก3 แล้วจัดรูปใหม่จะได้สมการที่ ก6 โดยมีขั้นตอนดังนี้

$$\frac{PE\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ} - \frac{O}{E}\left[I + \frac{GE\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ}\right] + M_o \cos\phi = 0$$

$$\frac{PE\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ} - \frac{IO}{E} - \frac{OG\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ} + M_o \cos\phi = 0$$

$$\frac{(PE - OG)\left(N + M_o \sin\phi + \frac{IJ}{E}\right)}{KE - GJ} - \frac{IO}{E} + M_o \cos\phi = 0$$

$$M_o\left(\frac{(PE - OG)\sin\phi}{KE - GJ} + \cos\phi\right) = \frac{IO}{E} - \left(\frac{PE - OG}{KE - GJ}\right)\left(N + \frac{IJ}{E}\right)$$

$$M_o\left(R\sin\phi + \cos\phi\right) = S - RQ$$

$$M_o = \frac{S - RQ}{R\sin\phi + \cos\phi} \qquad (ก6)$$

คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน X ทำให้ได้สมการที่ ก7 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{2Lx} + F_{2Rx} + F_{1x} = 0$$

$$F_{1x} = -\left(F_{2Lx} + F_{2Rx}\right) \qquad \text{(ก7)}$$

คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน Y ทำให้ได้สมการที่ ก8 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{2Ly} + F_{2Ry} + F_{1y} = 0$$

$$F_{1y} = -\left(F_{2Ly} + F_{2Ry}\right) \qquad \text{(ก8)}$$

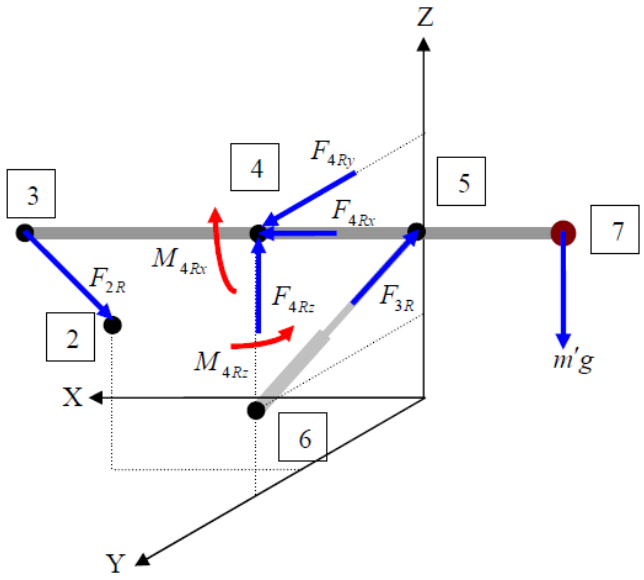
คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน Z ทำให้ได้สมการที่ ก9 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\sum F_z = 0$$

$$F_{2Lz} + F_{2Rz} + F_{1z} - m'g = 0$$

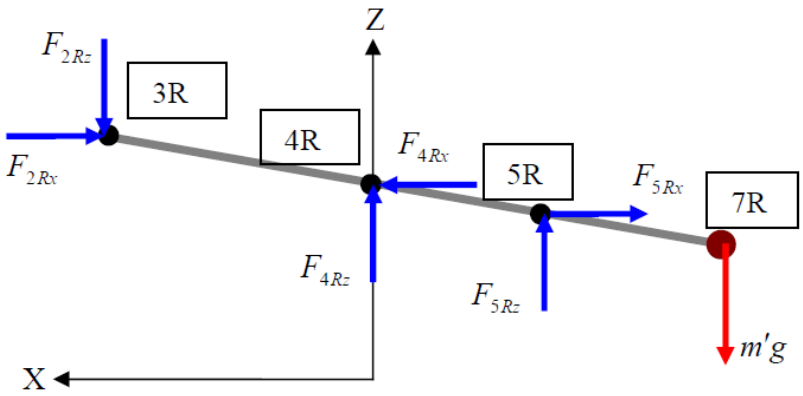
$$F_{1z} = m'g - \left(F_{2Lz} + F_{2Rz}\right) \qquad \text{(ก9)}$$

พิจารณาเฉพาะแรงกระทำแขนหมายเลข 3 ด้านขวาจากฟรีบอดี้ไดอะแกรมดังแสดงในภาพที่ ก7 จะเห็นว่ามีแรงจากแขนหมายเลข 2 ซึ่งแทนด้วย F_{2R} กระทำที่ตำแหน่ง 2 โดยแรงนี้เป็นทูฟอร์สเมมเบอร์ มีทิศทางชี้ในแนวการวางตัวของแขนหมายเลข 2 คือชี้จากตำแหน่ง 2 ไป 3 มีโมเมนต์และแรงกระทำที่ตำแหน่งข้อต่อ 4 แรงจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นกระทำที่ตำแหน่ง 5 และแรงเนื่องจากมวลถ่วงกระทำที่ตำแหน่ง 7



ภาพที่ ก7 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3

พิจารณาแขนหมายเลข 3 ในระนาบ X-Z ดังแสดงในภาพที่ ก8 คำนวณสมดุลของโมเมนต์ในแนวแกน Y ที่ตำแหน่งข้อต่อ 4 ทำให้ได้สมการที่ ก10 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ ก8 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3 ในระนาบ X-Z

$$\sum M_{4Ry} = 0$$

$$(x_{3R} - x_{4R})\hat{i} \times (-F_{2Rz})\hat{k} + (z_{3R} - z_{4R})\hat{k} \times (-F_{2Rx})\hat{i} + (x_{5R} - x_{4R})\hat{i} \times (F_{3Rz})\hat{k}$$
$$+ (z_{5R} - z_{4R})\hat{k} \times (F_{3Rx})\hat{i} + (x_{7R} - x_{4R})\hat{i} \times (-m'g)\hat{k} = 0$$

$$(x_{3R}-x_{4R})(F_{2Rz})-(z_{3R}-z_{4R})(F_{2Rx})-(x_{5R}-x_{4R})(F_{3Rz})+(z_{5R}-z_{4R})(F_{3Rx})+(x_{7R}-x_{4R})(m'g)=0$$

$$(x_{3R}-x_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{z}_{23L}\right|\right)-(z_{3R}-z_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{x}_{23R}\right|\right)-(x_{5R}-x_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{z}_{65R}\right|\right)+(z_{5R}-z_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{x}_{65R}\right|\right)$$
$$+(x_{7R}-x_{4R})(m'g)=0$$

$$F_{2R}\left[(x_{3R}-x_{4R})\left|\hat{z}_{23L}\right|-(z_{3R}-z_{4R})\left|\hat{x}_{23R}\right|\right]+F_{3R}\left[-(x_{5R}-x_{4R})\left|\hat{z}_{65R}\right|+(z_{5R}-z_{4R})\left|\hat{x}_{65R}\right|\right]$$
$$+(x_{7R}-x_{4R})(m'g)=0$$

$$F_{3R}=\frac{-F_{2R}\left[(x_{3R}-x_{4R})\left|\hat{z}_{23R}\right|-(z_{3R}-z_{4R})\left|\hat{x}_{23R}\right|\right]-(x_{7R}-x_{4R})m'g}{-(x_{5R}-x_{4R})\left|\hat{z}_{65R}\right|+(z_{5R}-z_{4R})\left|\hat{x}_{65R}\right|}$$

$$F_{3L}=\frac{m'g(x_{7L}-x_{4L})+F_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right|(x_{3L}-x_{4L})-F_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right|(z_{3L}-z_{4L})}{\left|\hat{z}_{65L}\right|(x_{4L}-x_{5L})-\left|\hat{x}_{65L}\right|(z_{4L}-z_{5L})} \qquad \text{(ก10)}$$

$$\vec{F}_{3R}=F_{3R}\left(\hat{x}_{65R}+\hat{y}_{65R}+\hat{z}_{65R}\right)$$

จาก $y_{6R}=y_{5R}$ ดังนั้น $\left|\hat{y}_{65R}\right|=0$

$$\vec{F}_{3R}=F_{3R}\left(\hat{x}_{65R}+\hat{z}_{65R}\right)$$

คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน X ทำให้ได้สมการที่ ก 11 มีขั้นตอนการคำนวณแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\sum F_x=0$$

$$-F_{2Rx}+F_{4Rx}+F_{3Rx}=0$$

$$F_{4Rx}=F_{2R}\left|\hat{x}_{23R}\right|-F_{3R}\left|\hat{x}_{65R}\right| \qquad \text{(ก11)}$$

คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน Y ทำให้ได้สมการที่ ก 12 มีขั้นตอนการคำนวณแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\sum F_y=0$$

$$-F_{2Ry}+F_{4Ry}+F_{3Ry}=0$$

$$F_{4Ry}=F_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right|-F_{3R}\left|\hat{y}_{65R}\right|$$

$$y_{6R}=y_{5R}$$

$$\left|\hat{y}_{65R}\right|=0$$

$$F_{4Ry}=F_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right| \qquad \text{(ก12)}$$

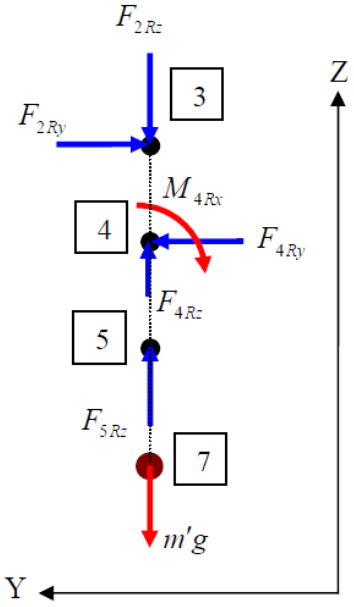
คำนวณสมดุลของแรงในแนวแกน Z ทำให้ได้สมการที่ ก 13 มีขั้นตอนการคำนวณแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\sum F_z = 0$$

$$-F_{2Rz} + F_{4Rz} + F_{3Rz} - m'g = 0$$

$$F_{4Rz} = F_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right| - F_{3R}\left|\hat{z}_{65R}\right| + m'g \qquad \text{(ก13)}$$

พิจารณาแขนหมายเลข 3 ในระนาบ Y-Z ดังแสดงในภาพที่ ก9 คำนวณสมดุลของโมเมนต์ในแนวแกน X ที่ตำแหน่งข้อต่อ 4 ทำให้ได้สมการที่ ก 14 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณแสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ ก9 Free Body Diagram ของแขนหมายเลข 3 ในระนาบ Y-Z

$$\sum M_{4Rx} = 0$$

$$(y_{3R} - y_{4R})\hat{j} \times (-F_{2Rz})\hat{k} + (z_{3R} - z_{4R})\hat{k} \times (-F_{2Ry})\hat{j} + (y_{5R} - y_{4R})\hat{j} \times (F_{3Rz})\hat{k} + (z_{5R} - z_{4R})\hat{k} \times (F_{3Ry})\hat{j} + (y_{7R} - y_{4R})\hat{j} \times (-m'g)\hat{k} + M_{4Rx} = 0$$

$$(y_{3R} - y_{4R})(-F_{2Rz}) + (z_{3R} - z_{4R})(F_{2Ry}) + (y_{5R} - y_{4R})(F_{3Rz}) - (z_{5R} - z_{4R})(F_{3Ry}) + (y_{7R} - y_{4R})(-m'g) + M_{4Rx} = 0$$

$$(y_{3R}-y_{4R})\left(-F_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right|\right)+(z_{3R}-z_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right|\right)+(y_{5R}-y_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{z}_{65R}\right|\right)$$
$$-(z_{5R}-z_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{y}_{65R}\right|\right)+(y_{7R}-y_{4R})(-m'g)+M_{4Rx}=0$$

$$M_{4Rx}=(y_{3R}-y_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{z}_{23R}\right|\right)-(z_{3R}-z_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right|\right)-(y_{5R}-y_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{z}_{65R}\right|\right)+(z_{5R}-z_{4R})\left(F_{3R}\left|\hat{y}_{65R}\right|\right)+(y_{7R}-y_{4R})(m'g)$$

จาก $y_{3R}=y_{4R}=y_{5R}$ ดังนั้น $\left|\hat{y}_{65R}\right|=0$

$$M_{4Rx}=-(z_{3R}-z_{4R})\left(F_{2R}\left|\hat{y}_{23R}\right|\right) \quad \text{(ก14)}$$

การพิจารณาเฉพาะแรงกระทำแขนหมายเลข 3 ด้านซ้ายสามารถทำได้เช่นเดียวกับการพิจารณาเฉพาะแรงกระทำด้านขวาดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยสมการแรงกระทำแขนหมายเลข 3 ด้านซ้ายที่ได้มีรูปแบบดังนี้

$$F_{3L}=\frac{-F_{2L}\left[(x_{3L}-x_{4L})\left|\hat{z}_{23L}\right|-(z_{3L}-z_{4L})\left|\hat{x}_{23L}\right|\right]-(x_{7L}-x_{4L})m'g}{-(x_{5L}-x_{4L})\left|\hat{z}_{65L}\right|+(z_{5L}-z_{4L})\left|\hat{x}_{65L}\right|}$$

$$F_{3L}=\frac{m'g(x_{7L}-x_{4L})+F_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right|(x_{3L}-x_{4L})-F_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right|(z_{3L}-z_{4L})}{\left|\hat{z}_{65L}\right|(x_{4L}-x_{5L})-\left|\hat{x}_{65L}\right|(z_{4L}-z_{5L})} \quad \text{(ก15)}$$

$$\vec{F}_{3L}=F_{3L}\left(\hat{x}_{65L}+\hat{z}_{65L}\right) \quad \text{(ก16)}$$

$$F_{4Lx}=F_{2L}\left|\hat{x}_{23L}\right|-F_{3L}\left|\hat{x}_{65L}\right| \quad \text{(ก17)}$$

$$F_{4Ly}=F_{2L}\left|\hat{y}_{23L}\right| \quad \text{(ก18)}$$

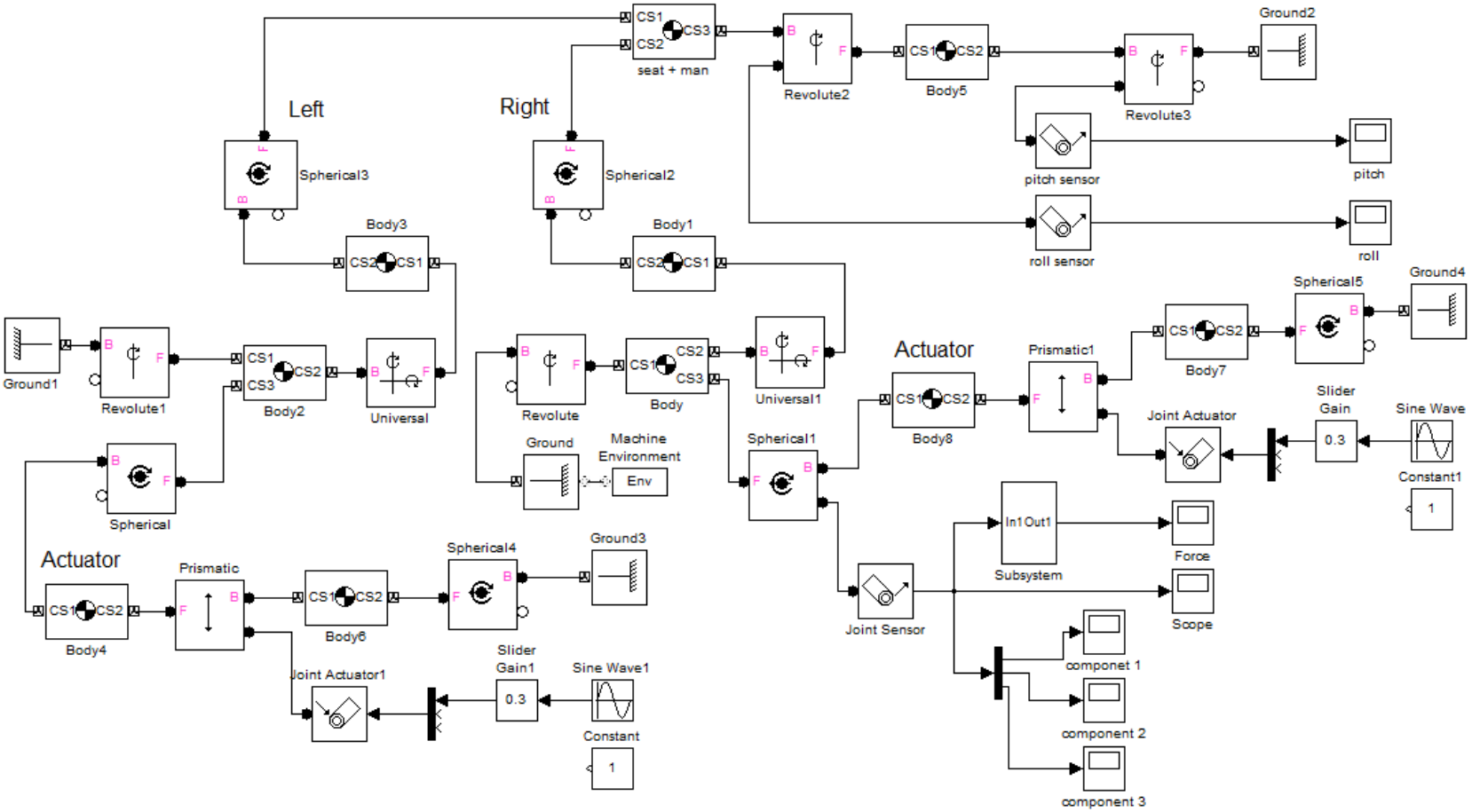
$$F_{4Lz}=F_{2L}\left|\hat{z}_{23L}\right|-F_{3L}\left|\hat{z}_{65L}\right|+m'g \quad \text{(ก19)}$$

$$M_{4Lx}=-(z_{3L}-z_{4L})\left(F_{2L}\left|\hat{y}_{23L}\right|\right) \quad \text{(ก20)}$$

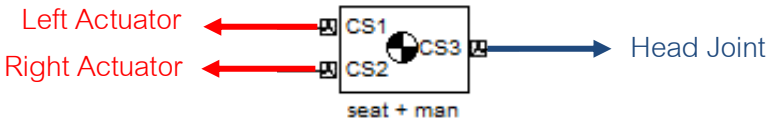
ภาคผนวก ข

วิเคราะห์การเคลื่อนไหวกลไกด้วยโปรแกรม MATLAB SimMechanic

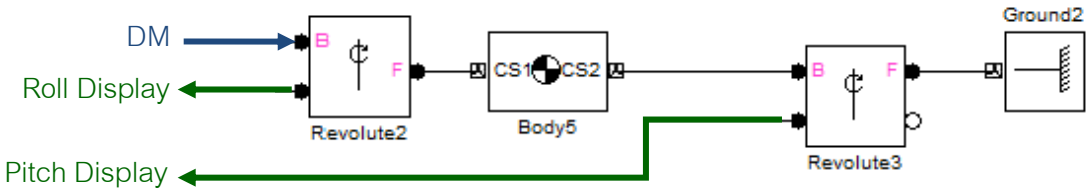
การสร้างแบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหวจะใช้วิธีกำหนดตำแหน่งข้อต่อ ความยาวของแขนกลไก และความยาวของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้น เพื่อจำลองกลไกการเคลื่อนไหว และวัดขนาดมุมพิทช์และมุมโรลที่ระบบจำลองการขับขี่ยานยนต์สามารถสร้างได้ ระบบดังแบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหวแสดงในภาพที่ ข1 ประกอบด้วย โครงสร้างที่นั่งดังแสดงในภาพที่ ข2 ข้อต่อเหนือศีรษะดังแสดงในภาพที่ ข3 แขนหมายเลข 2 และแขนหมายเลข 3 ดังแสดงในภาพที่ ข4 อุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ ข5 และส่วนแสดงผลดังแสดงในภาพที่ ข6



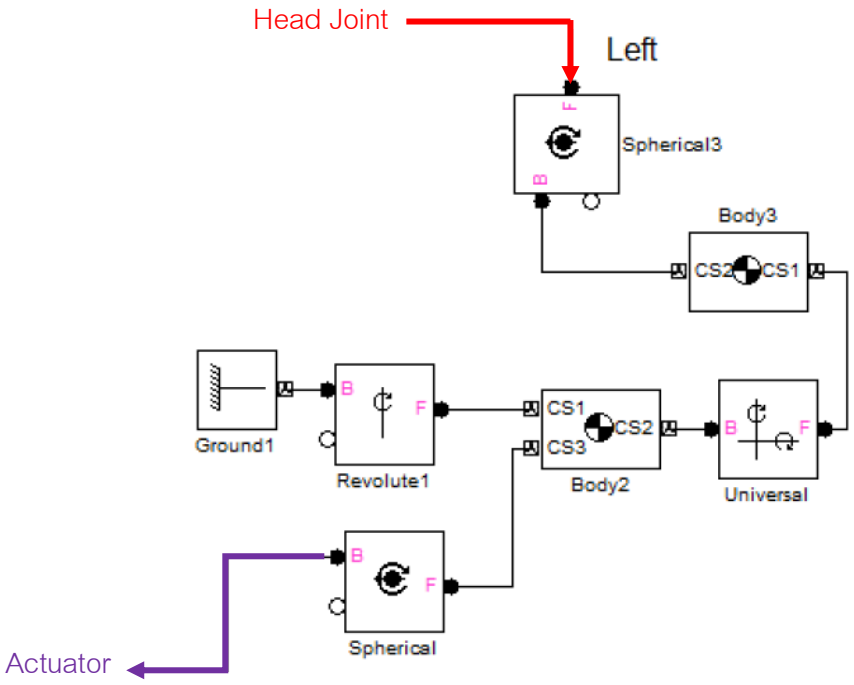
ภาพที่ ข1 ระบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว



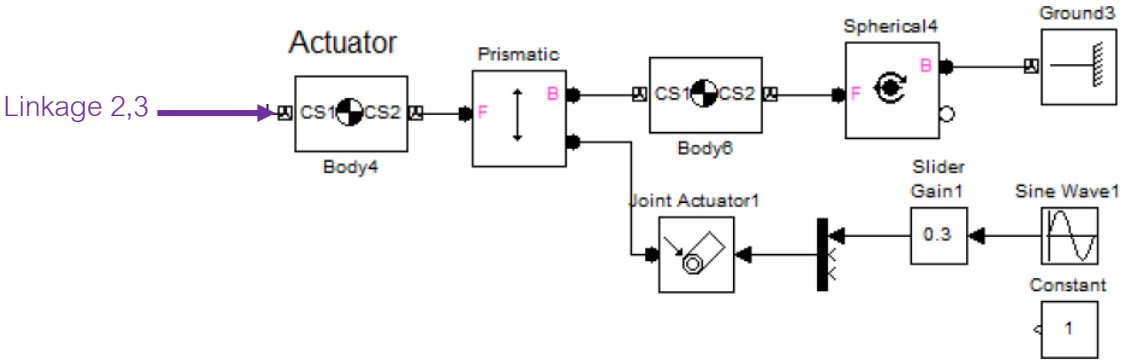
ภาพที่ ข2 โครงสร้างที่นั่ง (Driving Module, DM)



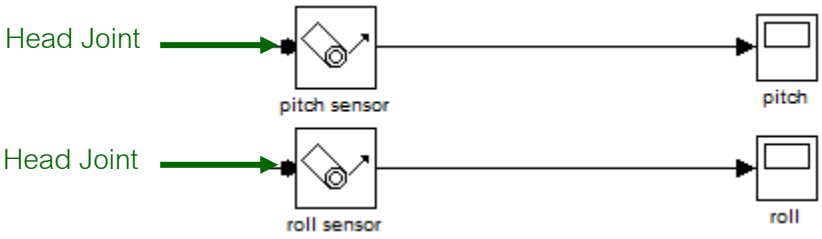
ภาพที่ ข3 ข้อต่อเหนือศีรษะ



ภาพที่ ข4 แขนหมายเลข 2 และแขนหมายเลข 3

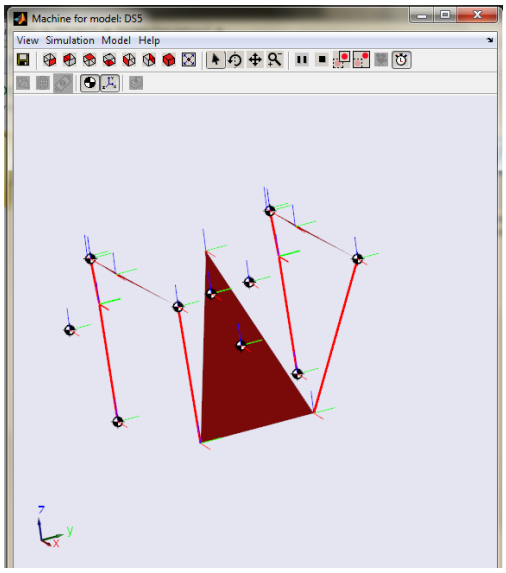


ภาพที่ ข5 อุปกรณ์ขับเชิงเส้น



ภาพที่ ข6 ส่วนแสดงผล

ระบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหวที่สร้างขึ้นได้โครงสร้างกลไกมีลักษณะดังที่แสดงในภาพที่ ข7



ภาพที่ ข7 โครงสร้างกลไกที่ได้จากแบบจำลองกลไกการเคลื่อนไหว

ภาคผนวก ค
รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง

ค.1 รายละเอียดโพเทนซิโอมิเตอร์

โพเทนซิโอมิเตอร์เชิงเส้นที่ใช้ในการทดลองคือ GEFRAN PZ34-S-200 ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ ค1 ซึ่งคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ ค1

ภาพที่ ค1 โพเทนซิโอมิเตอร์เชิงเส้น GEFRAN PZ34-S-200

ตารางที่ ค1 คุณสมบัติของโพเทนซิโอมิเตอร์

Technical Data	
Useful electrical stroke	200
Resolution	Infinite
Protection	IP60
Displacement speed	< = 10 m/s
Displacement force	< = 0.5 N
Life	> 25 x 10^6 m stroke, or 100 x 10^6 operations, whichever is less
Vibration	5...2000 Hz, Amax= 0.75 mm, amax= 20 g
Shock	50 g, 11 ms
Tolerance on resistance	$\pm$ 20%
Recommended cursor current	< 0.1 μA

ตารางที่ ค1 คุณสมบัติของโพเทนชิโอมิเตอร์

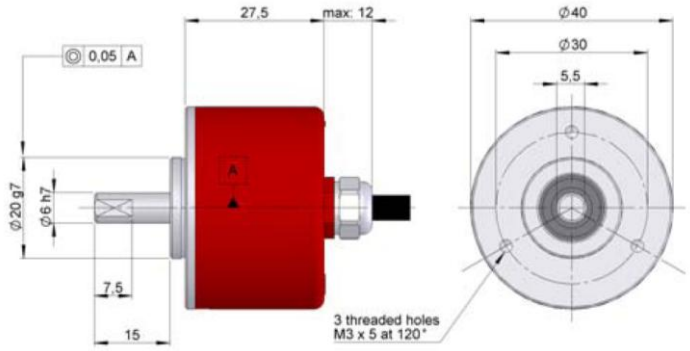
Technical Data	
Maximum cursor current	10 mA
Electrical isolation	> 100 MΩ at 500 V=, 1 bar, 2s
Dielectric strength	< 100 μA at 500 V~ , 50 Hz, 2 s, 1 bar
Actual Temperature Coefficient of the output voltage	< 1.5 ppm/ °C
Working temperature	-30…+100 °C
Storage temperature	-50…+120 °C
Case material	Anodised aluminum Nylon 66 G 25
Fixing	Brackets, selfaligning ball-joints or flange

ในการหาสมการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่ามุมการโคลงใช้การหาความสัมพันธ์จากข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งการโคลงต่างๆ โดยทำซ้ำทั้งหมด 10 รอบและหาค่าเฉลี่ยมาเพื่อสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น สมการที่ใช้แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นค่ามุมการโคลงได้แทนด้วยสมการเชิงเส้นดังแสดงในสมการที่ ค1

$$Y = -8.7188X + 35.368 \qquad (1ค)$$

ค.2 รายละเอียดเอนโคดเดอร์

เอนโคดเดอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ HOHNER Automaticos S.L. Breda. Espana Series 21 ดังแสดงในภาพที่ ค2 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ ค2



ภาพที่ ค2 HOHNER Series 21

ตารางที่ ค2 แสดงคุณสมบัติของเอนโคดเดอร์ HOHNER Series 21

Mechanical Specification	
Housing	Aluminium
Shaft	Stainless Steel
Bearings	Ballraces
Bearings lifetime	1 x 10^{10} rev.
Maximum number of revolutions permitted mechanically	5000 rpm
Protection against dust and splashes according to DIN 40050	IP41
Rotor inertia moment	10 gcm^2
Starting torque at 20°C	Max. / 0.4 Ncm
Maximum load permitted on axial shaft	5 N
Maximum load permitted on radial shaft	5 N
Weight aprox.	0.2 Kg
Operating temperature range	-20°C to +60°C
Vibration	100 m/s^2 (10…2000 Hz)
Shock	1000 m/s^2 (6 ms)
Maximum pulses per turn	500
Axial connection	Cable 1 meter

ค.3 รายละเอียด NI CompactRIO

NI CompactRIO เป็นอุปกรณ์ประมวลผลซึ่งมีหลายรูปแบบแบ่งตามชนิดของการใช้งาน โดย NI CompactRIO ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็น NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074 ดังแสดงในภาพที่ ค3 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ ค3

ภาพที่ ค3 NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074

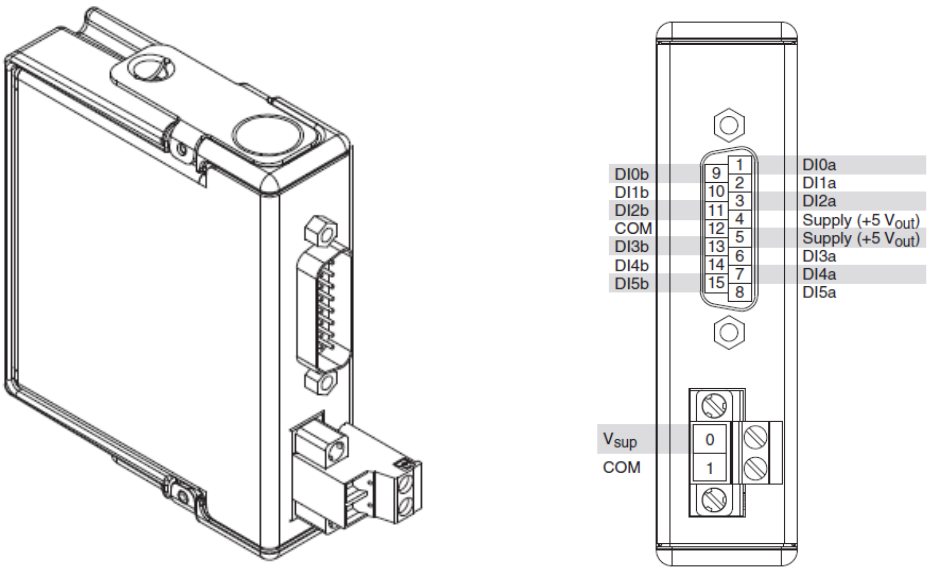
ตารางที่ ค3 คุณสมบัติของ NI CompactRIO รุ่น NI cRIO9074

General	
Product Name	cRIO-9074
Form Factor	CompactRIO
Product Type	Controller (Computing Device)
Part Number	779999-01
Operating System/Target	Real-Time
LabVIEW RT Support	Yes
CE Compliance	Yes
Reconfigurable FPGA	
FPGA	Spartan-3
Gates	2000000
Chassis	
Number of Slots	8
Input Voltage Range	19 V , 30 V
Recommended Power Supply: Power	48 W
Recommended Power Supply: Voltage	24 V
Power Consumption	20 W

ตารางที่ ค3 คุณสมบัติของ NI CompactRIO รุ่น NI cRIO9074

Physical Specifications	
Length	28.97 cm
Width	8.73 cm
Height	5.89 cm
Weight	929 gram
Minimum Operating Temperature	-20 °C
Maximum Operating Temperature	55 °C
Maximum Altitude	2000 m

ส่วนโมดูลซึ่งใช้เชื่อมต่อสายสัญญาณที่ใช้ประกอบด้วย NI 9411 ดังภาพที่ ค4 และ NI 9025 ดังภาพที่ ค5 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ค4 และ ค5 ดังนี้



ภาพที่ ค4 โมดูล NI 9411

ตารางที่ ค4 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9411

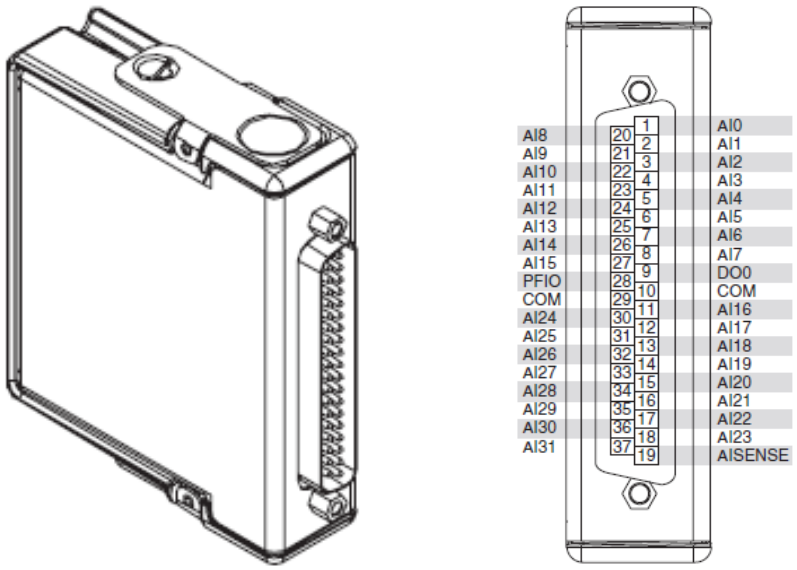
NI 9411	
Specification The following specifications are typical for the range -40 to 70 ºC unless otherwise noted. All voltages are relative to COM unless otherwise noted.	
Input Characteristics	
Number of channels	6 digital input channels
Input type	Differential or single-ended
Digital logic levels	
Differential (DIa-DIb)	
Input high range	300 mV to 24 V
Input low range	-300 mV to -24 V
Common-mode voltage[1]	-7 to 12 V
Single-ended	
Input high range	2 to 24 V
Input low range	0 to 0.8 V
Input current	
At 5 V	±1 mA per channel
At 24 V	±4 mA per channel
Input impedance	8.4 kΩ
I/O protection	
Input voltage (channel-to-COM)	30 V max
Input current	±4 mA, internally limited
Input delay time	500 ns max
MTBF	800, 319 hours at 25 ºC; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method

ตารางที่ ค4 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9411

NI 9411	
Power Requirement	
Power consumption from chassis	
Active mode	340 mW max
Sleep mode	1.1 mW max
Thermal dissipation (at 70 ºC)	
Active mode	1.4 W max
Sleep mode	1.1 W max
External Power Supply	
Input voltage range (V_{sup})	5 to 30 VDC max
5 V regulated output	
Voltage tolerance	5 V ± 3%, $V_{sup} \geq$ 6 V
Current	200 mA
Short-circuit protection	400 mA
Physical Characteristics	
If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.	
Screw-terminal wiring	12 to 24 AWG copper conductor wire with 10 mm (0.39 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals	0.5 to 0.6 N · m (4.4 to 5.3 lb · in.)
Ferrules	0.25 mm^2 to 0.5 mm2
Weight	136 g (4.8 oz)

ตารางที่ ค4 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9411

NI 9411	
Safety Voltages	
Connect only voltages that are within the following limits.	
Channel-to-COM	
or V_{sup}-to-COM	30 V max, Measurement Category Isolation
Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	
Continuous	30 Vrms, 42.4 Vpk, 60 VDC
Withstand	400 Vrms, verified by a 5 s dielectric withstand test

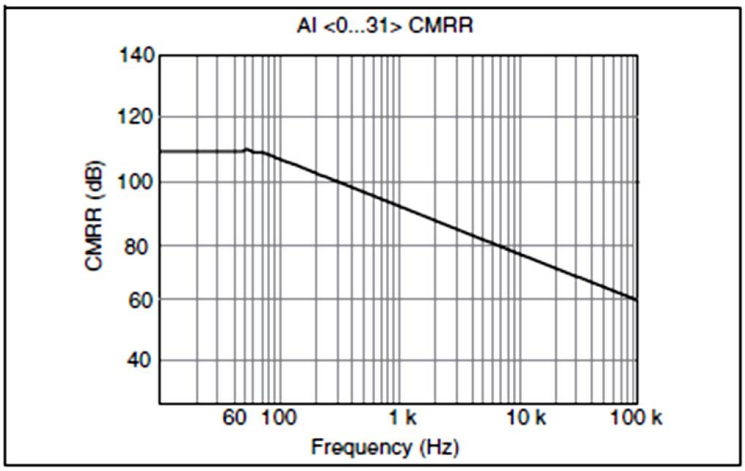


ภาพที่ ค5 โมดูล NI 9025

ตารางที่ ค5 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9025

NI 9205	
Specifications The following specifications are typical for the range –40 to 70 °C unless otherwise noted. All voltages are relative to COM unless otherwise noted.	
Analog Input Characteristics	
Number of channels	32 single-ended or 16 differential analog input channels, 1 digital input channel, and 1 digital output channel
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the *AI Absolute Accuracy Tables and Formulas*
MTBF	775,832 hours at 25 °C; Bellcore Issue 6, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method
Conversion time	
R Series Expansion chassis	4.50 µs (222 kS/s)
All other chassis	4.00 µs (250 kS/s)
Input coupling	DC
Nominal input ranges	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V
Minimum overrange (for 10 V range)	4%

ตารางที่ ค5 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9025

NI 9205
Analog Input Characteristics Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode) ..... Each channel must remain within ±10.4 V of common Input impedance (AI-to-COM) Powered on ..... 10 GΩ in parallel with 100 pF Powered off/overload ..... 4.7 kΩ min Input bias current ..... ±100 pA Crosstalk (at 100 kHz) Adjacent channels ..... –65 dB Non-adjacent channels ..... –70 dB Analog bandwidth ..... 370 kHz Overvoltage protection AI channel (0 to 31) ..... ±30 V (one channel only) AISENSE ..... ±30 V CMRR (DC to 60 Hz) ..... 100 dB
Typical AI+ to AI– CMRR graph 

ตารางที่ ค5 คุณสมบัติของโมดูลรุ่น NI 9025

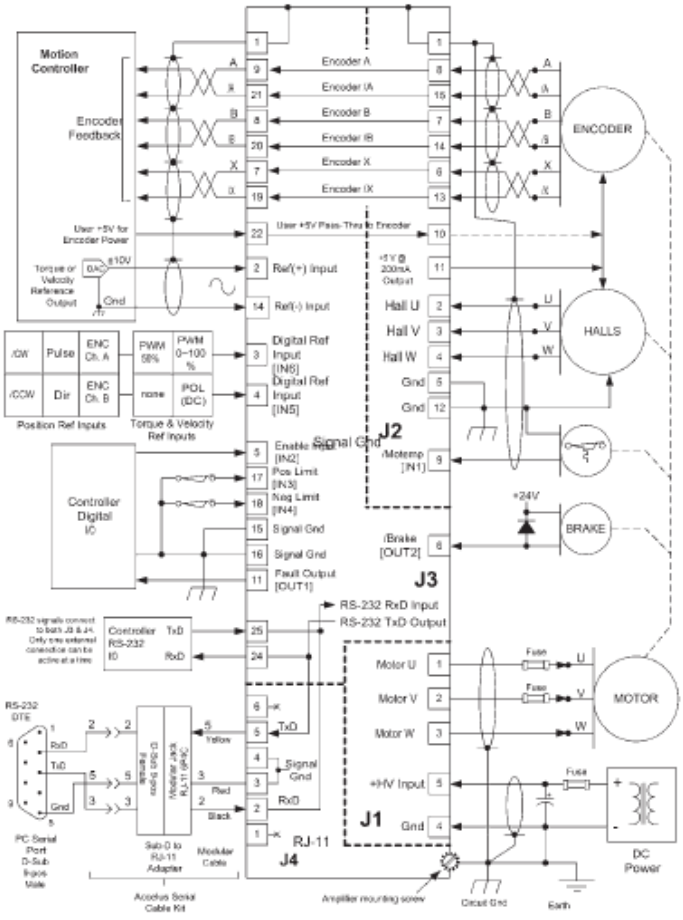
NI 9205	
Settling time for multichannel measurements, accuracy, all ranges	
±120 ppm of full-scale step	
(±8 LSB)	4 µs convert interval
±30 ppm of full-scale step	
(±2 LSB)	8 µs convert interval
Analog triggers	
Number of triggers	1
Resolution	10 bits, 1 in 1,024
Bandwidth (–3 dB)	370 kHz
Accuracy	±1% of full scale
Scaling coefficients	
Nominal Range (V)	**Typical Scaling Coefficient (µV/LSB)**
±10	328
±5 2	164.2
±1	32.8
±0.2	6.57

ค.4 รายละเอียด Accelus

Accelus เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) ซึ่งใช้ในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งมีคุณสมบติดังแสดงในตารางที่ ค6 ส่วนวงจรภายในและช่องการเชื่อมต่อสายสัญญาณแสดงในภาพที่ ค6 และ ค7

ตารางที่ ค6 คุณสมบติของ Accelus

Control Modes	Gearing, Position, Velocity, Torque
Command Interface	Stepper commands ±10 V velocity/torque command PWM velocity/torque command Master encoder [Gearing]
Communication	RS232
Feedback	Digital Quad A/B encoder Digital Halls
I/O – Digital	6 Inputs, 2 Outputs
Dimesions: mm [in]	168 x 99 x 31 [6.6 x 3.9 x 1.2]



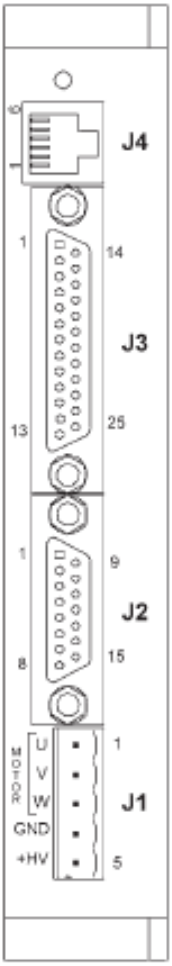
ภาพที่ ค6 ส่วนวงจรภายในของ Accelus

NOTES
1. The function of signals on J2-9, and J3-3, 4, 6, 11, 17,18 are programmable. Default functions are shown.
2. The function of [IN2] on J2-5 is always Amplifier Enable and is not programmable. The active level of [IN2] is programmable, and amplifier Reset with enable is programmable.

J4 SIGNAL	PIN
No Connection	1
RxD Input	2
Ground	3
Ground	4
TxD Output	5
No Connection	6

J3 SIGNAL	PIN
Chassis Ground	1
Ref(+) Input	2
PWM Ref Input [IN6]	3
Direction Input [IN5]	4
Enable Input [IN2]	5
Motor Brake Output [OUT2]	6
Encoder X Output	7
Encoder B Output	8
Encoder A Output	9
Signal Ground	10
Fault Output [OUT1]	11
Signal Ground	12
Signal Ground	13

J2 SIGNAL	PIN
Chassis Ground	1
Hall U Input	2
Hall V Input	3
Hall W Input	4
Signal Ground	5
Encoder X Input	6
Encoder B Input	7
Encoder A Input	8



PIN	J3 SIGNAL
14	Ref(-) Input
15	Signal Ground
16	Signal Ground
17	[IN3] Forward Enable Input
18	[IN4] Reverse Enable Input
19	Encoder /X Output
20	Encoder /B Output
21	Encoder /A Output
22	User +5V Pass-Thru
23	+5V @ 200 mA
24	RS-232 TxD Output
25	RS-232 RxD Input

PIN	J2 SIGNAL
9	[IN1] Motor Temp Sensor
10	User +5V Pass-Thru
11	+5V @ 200 mA
12	Signal Ground
13	Encoder /X Input
14	Encoder /B Input
15	Encoder /A Input

PIN	J1 SIGNAL
1	Motor U Output
2	Motor V Output
3	Motor W Output
4	GND
5	+HV Input

ภาพที่ ค7 ช่องการเชื่อมต่อสายสัญญาณของ Accelus

ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและประมวลผลการทดลองของผู้ทดสอบแต่ละคน

ง.1 ข้อมูลของผู้ทดสอบการจำลองการโคลงของรถยนต์

ในการทดลองจำลองการโคลงของรถยนต์ใช้จำนวนผู้ทดสอบทั้งหมด 33 คนตามรายชื่อที่แสดงในตารางที่ ง1 ซึ่งผู้ทดสอบทุกคนจะทำการทดสอบ 2 ลักษณะคือ การจับพวงมาลัยแบบมือเดียวด้านขวา และการจับพวงมาลัยแบบสองมือ ซึ่งรายละเอียดข้อมูลของผู้ทดสอบและข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะแสดงในแผ่นดิสก์

ตารางที่ ง1 รายชื่อของผู้ทดสอบจำลองการโคลงของรถยนต์ทั้งหมด 33 คน

ลำดับที่	ชื่อ	นามสกุล	เพศ	น้ำหนัก	ส่วนสูง
1	ณัฐชนา	บุญสร้าง	หญิง	53	170
2	เอกวุฒิ	หาญดำรงธรรม	ชาย	82	170
3	อานันท์	จันสุระวงศ์	ชาย	66	168
4	ปิยภูมิ	สีชัง	ชาย	62	176
5	กฤษชรัตน์	พรพจนานันท์	ชาย	79	180
6	สุกฤษฎิ์	นรากรพิจิตร	ชาย	80	173
7	พงศกร	วัลลิสุต	ชาย	52	176
8	ชุตาภรณ์	จิรวรรณสถิตย์	หญิง	44	165
9	มินท์มันตา	ชมภูแสง	หญิง	37	150
10	ชัชนี	ภควัตสุนทร	หญิง	49	168
11	อรอุมา	เมธนิมิต	หญิง	50	163
12	พิชญา	มนัสวีพงศ์สกุล	หญิง	50	161
13	ธนวัฒน์	ลิ้มวรรณกูร	ชาย	72	174
14	ปาณัสม์	เอี่ยมวรพงษ์	หญิง	68	161
15	พสัน	เจริญปัญญายิ่ง	ชาย	55	168
16	ภาพ	สกุลดิษฐ์	ชาย	69	175

ตารางที่ ง1 รายชื่อของผู้ทดสอบจำลองการโคลงของรถยนต์ทั้งหมด 33 คน

ลำดับที่	ชื่อ	นามสกุล	เพศ	น้ำหนัก	ส่วนสูง
17	ภานิษฐ์	ตีรสวัสดิชัย	ชาย	55	170
18	อนงค์นาถ	แก้วศรีทองคำ	หญิง	43	156
19	ชญาดา	ไชยมานนท์	หญิง	50	163
20	สุกฤษฎิ์	เจียนธนกานนท์	ชาย	71.5	183
21	ฑีฆายุ	ลิ้มจำรูญ	ชาย	70	170
22	ธงชัย	สันติมงคล	ชาย	55	175
23	ปฤษฎางค์	โปษณกุล	ชาย	68	175
24	วรนล	โตวิจิตร	ชาย	58	171
25	กิตติรัตน์	จรูญวิทย์	ชาย	62	180
26	รัตนพงศ์	ชยางกูร ณ อยุธยา	ชาย	52	183
27	ปรัณยา	ธารณเจษฎา	หญิง	48	160
28	ตฤณโชค	เอี่ยมมนัสกุล	ชาย	65	164
29	โสพิชา	ปาติยเสวี	หญิง	49	162
30	อัครยา	แก้วเกตุ	หญิง	43	152
31	กันยารัตน์	ปลัดสิงห์	หญิง	52	170
32	อภิญญา	สิทธิมงคลการ	หญิง	50	150
33	กุลิสรา	สิงหเชนทร์	หญิง	59	163

จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียวจะแตกต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ ง2 และเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้างแต่ละคนจะมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ ง3

ตารางที่ ง2 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
1	0.4	10	100	50	0.3
2	0.15	4	100	50	0.15
3	0.3	10	100	50	0.3
4	0.3	15	100	70	0.2
5	1	10	100	40	0.2
6	0.6	6	200	40	0.2
7	0.5	8	80	40	0.2
8	0.4	15	100	50	0.2
9	0.6	5	100	30	0.2
10	0.7	15	100	40	0.2
11	0.9	15	100	40	0.2
12	1	10	100	30	0.15
13	0.2	6	100	60	0.2
14	1	10	100	40	0.2
15	0.3	4	80	50	0.4
16	0.5	20	100	60	0.1
17	0.5	20	100	60	0.1
18	0.4	10	100	40	0.2
19	0.7	10	100	40	0.2
20	0.4	10	100	40	0.2
21	0.15	3	100	40	0.2
22	-	-	-	-	-
23	0.3	7	100	40	0.2
24	0.8	30	200	50	0.1
25	0.4	10	100	50	0.2
26	1	30	100	50	0.2

ตารางที่ ง2 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือขวาข้างเดียว

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
27	0.4	15	100	60	0.2
28	0.2	5	100	40	0.2
29	5	10	2	40	0.1
30	1	20	100	40	0.2
31	0.6	5	100	30	0.2
32	0.7	20	200	50	0.2
33	0.6	15	100	50	0.2

ตารางที่ ง3 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
1	0.2	10	100	50	0.3
2	0.3	5	50	50	0.3
3	0.25	20	100	50	0.15
4	0.2	25	100	60	0.2
5	0.5	10	100	40	0.15
6	0.4	5	300	30	0.3
7	0.3	5	300	30	0.3
8	0.3	10	100	40	0.2
9	0.4	10	200	30	0.1
10	0.8	8	6	50	0.2
11	0.8	20	100	30	0.2
12	0.3	4	50	30	0.2
13	0.3	20	100	50	0.2
14	0.2	8	50	50	0.1
15	0.2	10	50	60	0.2
16	0.2	8	50	50	0.2

ตารางที่ ง3 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยด้วยมือทั้ง 2 ข้าง

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
17	0.5	6	50	30	0.2
18	0.6	20	100	40	0.2
19	0.3	20	100	40	0.2
20	0.3	20	100	40	0.2
21	0.6	15	100	40	0.2
22	1.5	30	100	40	0.2
23	0.3	30	100	50	0.2
24	1	20	100	40	0.2
25	0.3	25	100	50	0.1
26	0.5	20	100	40	0.2
27	0.5	30	100	50	0.2
28	1.5	6	2	60	0.2
29	0.5	30	100	40	0.2
30	0.8	30	100	40	0.2
31	0.2	4	50	40	0.2
32	0.4	20	100	50	0.2
33	0.15	4	100	40	0.2

ง.2 ข้อมูลของผู้ทดสอบการจำลองการโคลงของรถสามล้อ

ในการทดลองจำลองการโคลงของรถสามล้อใช้จำนวนผู้ทดสอบทั้งหมด 30 คนตามรายชื่อที่แสดงในตารางที่ ง2 ซึ่งผู้ทดสอบทุกคนจะทำการทดสอบ 2 ลักษณะคือ การจับพวงมาลัยสามล้อห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร และห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร ซึ่งรายละเอียดข้อมูลของผู้ทดสอบและข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะแสดงในแผ่นดิสก์

ตารางที่ ง4 รายชื่อของผู้ทดสอบจำลองการโคลงของรถสามล้อทั้งหมด 30 คน

ลำดับที่	ชื่อ	นามสกุล	เพศ	น้ำหนัก	ส่วนสูง
1	เอกวุฒิ	หาญดำรงธรรม	ชาย	82	170
2	อานันท์	จันสุระวงศ์	ชาย	66	168
3	ปิยภูมิ	สีชัง	ชาย	62	176
4	กฤษชรัตน์	พรพจนานันท์	ชาย	79	180
5	จารุนนท์	ชูชาติ	ชาย	54	170
6	จีรเกียรติ์	จิรารัตนชัย	ชาย	55	170
7	นรุต	พัฒเสริฐ	ชาย	55	168
8	เชษรัฐ	มลตรีกฤษติพันธ์	ชาย	62	172
9	นิธิ	จิวรังเรือง	ชาย	54	171
10	ปฐมวัต	วัลสุประเสริฐ	ชาย	49	168
11	สุทธิพงษ์	กุลโชติรัตน์	ชาย	53	171
12	พงษ์พันธ์	บุญยะธีระ	ชาย	69	174
13	พงษุพัฒน์	กาญจนกัม	ชาย	55	170
14	กาวิน	นิวัฒสกุล	ชาย	65	179
15	หยุนหลง	ไล่	ชาย	60	168
16	เชาวลิต	รัตนวงศ์สกุล	ชาย	69	175
17	ฟูจิ	งามบรรจง	ชาย	68	175
18	ปฤษฎางค์	โปษณกุล	ชาย	68	175
19	พงศกร	วัลลิสุต	ชาย	52	176
20	ยสนันท์	ศิมากร	ชาย	60	174
21	วรนล	โตวิจิตร	ชาย	58	171
22	กิตติรัตน์	จรูญวิทย์	ชาย	62	180
23	ภาพ	สกุลดิษฐ์	ชาย	69	175
24	ภานิษฐ์	ตีรสวัสดิชัย	ชาย	55	170
25	อรรถนันท์	ปิยเสธ	ชาย	55	172
26	ภารน	ลิ้มสุวรรณ	ชาย	58	171

ตารางที่ ง4 รายชื่อของผู้ทดสอบจำลองการโคลงของรถสามล้อทั้งหมด 30 คน

ลำดับที่	ชื่อ	นามสกุล	เพศ	น้ำหนัก	ส่วนสูง
27	ชัยยันต์	สธีราศิลปิน	ชาย	56	174
28	วิทิศ	เรืองสุขวันณา	ชาย	56	173
29	ณัฐสุทธิ์	บุญยะธีระ	ชาย	50	172
30	มณฑล	กฤชรโยธิน	ชาย	57	175

จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคนเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตรจะแตกต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ ง5 และเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตรแต่ละคนจะมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ ง6

ตารางที่ ง5 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
1	12	4	0.1	35	0.05
2	3	15	0.5	35	0.02
3	0.6	8	1	40	0.03
4	500	4	0.001	40	0.02
5	0.8	-	-	40	0.1
6	0.6	30	100	40	0.1
7	0.1	8	100	50	0.1
8	1	8	1	40	0.03
9	0.8	-	-	40	0.08
10	1	4	2	70	0.08
11	2	8	2	40	0.05
12	0.7	4	2	50	0.1
13	1	4	1	40	0.03
14	1	4	1	40	0.08

ตารางที่ ง5 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 15 เซนติเมตร

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
15	1	4	1	40	0.04
16	5	15	0.5	35	0.03
17	0.9	5	1	42	0.02
18	0.5	-	-	42	0.01
19	1.3	2	0.3	40	0.02
20	6	10	0.1	32	0.05
21	1	8	1	40	0.04
22	1	5	1	40	0.02
23	0.2	12	100	40	0.1
24	0.5	12	100	41	0.1
25	0.6	30	100	47	0.07
26	0.9	30	100	60	0.2
27	0.7	30	800	50	0.2
28	8	2	0.1	45	0.03
29	0.4	10	4	35	0.04
30	0.4	10	100	47	0.1

ตารางที่ ง6 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
1	0.7	7	4	50	0.1
2	0.7	4	1	40	0.05
3	0.6	5	1	40	0.04
4	0.2	20	100	40	0.1
5	3	4	1	40	0.1
6	0.8	25	100	40	0.1
7	0.3	30	100	60	0.1

ตารางที่ ง6 ค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบเมื่อจับพวงมาลัยห่างจากจุดหมุน 30 เซนติเมตร

ลำดับที่	DC Gain	zero freq.	pole freq.	ω_n	ξ
8	0.2	20	100	40	0.1
9	3	4	1	40	0.1
10	0.8	2	1	40	0.02
11	1	6	4	40	0.1
12	10	3	0.1	38	0.02
13	1	5	1	38	0.03
14	0.8	5	2	35	0.03
15	6	4	0.1	35	0.02
16	0.7	5	2	40	0.02
17	0.2	8	100	45	0.05
18	0.5	-	-	40	0.1
19	5	10	1	40	0.1
20	0.1	12	100	38	0.1
21	0.5	10	2	35	0.05
22	2	6	0.5	40	0.02
23	0.1	8	100	41	0.1
24	1.5	4	1	43	0.05
25	0.8	30	100	50	0.2
26	1	30	90	45	0.15
27	0.5	40	110	50	0.3
28	0.5	50	100	50	0.1
29	0.1	20	130	50	0.08
30	0.5	30	100	50	0.2

ง.3 รายละเอียดของข้อมูลในแผ่นดิสก์

ภายในแผ่นดิสก์ประกอบด้วย 2 ไฟล์หลัก คือ ไฟล์การทดลองจำลองการโคลงของรถยนต์และไฟล์การทดลองจำลองการโคลงของรถสามล้อ ทั้ง 2 ไฟล์นี้จะมีข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดและค่าพารามิเตอร์ของผู้ทดสอบแต่ละคน ซึ่งข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงอยู่ในไฟล์ .xlsx กราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่แสดงอยู่ในไฟล์ .fig

ภาคผนวก จ

รายละเอียดการใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลข้อมูล

ในงานวิจัยนี้มีการใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการประมวลผลข้อมูลมากมาย ทั้งใช้เพื่อแปลงข้อมูลที่อยู่บนโดเมนของเวลาให้เป็นข้อมูลบนโดเมนความถี่ และใช้ในการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบด้วย

จ.1 การใช้คำสั่ง fft ในการหาผลการตอบสนองเชิงความถี่

การแปลงข้อมูลที่อยู่บนโดเมนของเวลาให้เป็นข้อมูลบนโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูรีเยแบบเร็ว ใช้คำสั่ง fft ในโปรแกรม MATLAB ได้มีการเขียนเป็น m-file เพื่อสะดวกในการใช้งานดังแสดงในภาพที่ จ1 จากโปรแกรมดังกล่าวนี้ได้สั่งให้แสดงข้อมูลบนโดเมนความถี่ออกมาเป็นกราฟที่มีแกนนอนเป็นความถี่หน่วยเป็น Hz และแกนตั้งเป็นขนาดที่ไร้หน่วย

```
%Number of points
N=2500;

%fft the 1st set of data
X=abs(fft(X1,N));
Y=abs(fft(Y1,N));
amp=X./Y;
F1=[0:N - 1]*1000/N;
figure,loglog(F1,amp,'-xb')
%fft the 2nd set of data
X=abs(fft(X2,N));
Y=abs(fft(Y2,N));
amp=X./Y;
F1=[0:N - 1]*1000/N;
hold on
loglog(F1,amp,'-xr')
%fft the 3rd set of data
X=abs(fft(X3,N));
Y=abs(fft(Y3,N));
amp=X./Y;
F1=[0:N - 1]*1000/N;
loglog(F1,amp,'-xg')

xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude');
```

ภาพที่ จ1 การใช้คำสั่ง fft บน m-file ของโปรแกรม MATLAB

จ.2 การใช้คำสั่ง spa ในการหาผลการตอบสนองเชิงความถี่

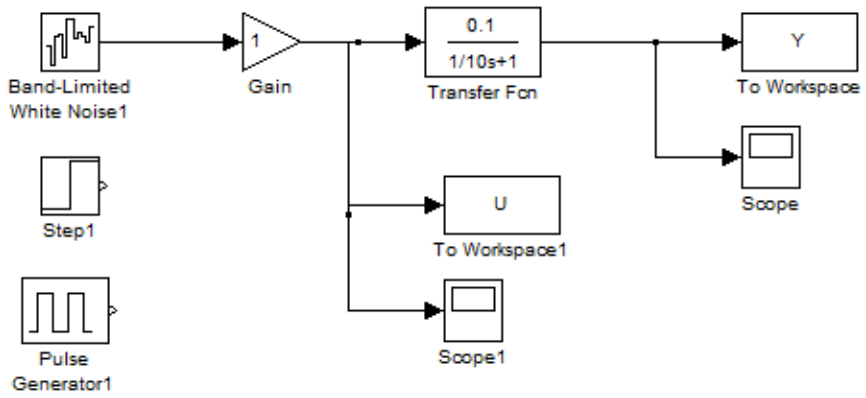
ในการแปลงข้อมูลที่อยู่บนโดเมนของเวลาให้เป็นข้อมูลบนโดเมนความถี่ด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม ใช้คำสั่ง spa ในโปรแกรม MATLAB ได้มีการเขียนเป็น m-file เพื่อสะดวกในการใช้งานดังแสดงในภาพที่ จ2

```
%Sampling time and number of points
Ts=0.001;
F=[0:2500];

%spa the 1st set of data
data1=iddata(X1,Y1,Ts);
G1=spa(data1,2500,F);
figure,bode(G1,'b');
fig1 = figure(1);
fig1sub1 = subplot(2,1,1);
h1 = get(gca,'children');
x1 = get(h1,'Xdata');
y1 = get(h1,'Ydata');

%spa the 2nd set of data
data2=iddata(X2,Y2,Ts);
G2=spa(data2,2500,F);
figure,bode(G2,'r');
fig2 = figure(2);
fig2sub1 = subplot(2,1,1);
h2 = get(gca,'children');
x2 = get(h2,'Xdata');
y2 = get(h2,'Ydata');

%spa the 3rd set of data
data3=iddata(X3,Y3,Ts);
G3=spa(data3,2500,F);
figure,bode(G3,'g');
fig3 = figure(3);
fig3sub1 = subplot(2,1,1);
h3 = get(gca,'children');
x3 = get(h3,'Xdata');
y3 = get(h3,'Ydata');

xx=(x1+x2+x3)/3;
mag =(y1+y2+y3)/3;
figure,loglog(x1,y1,'b')
hold on
loglog(x2,y2,'r')
loglog(x3,y3,'g')
loglog(xx,mag,'k')
xlabel('Frequency (rad/s)')
ylabel('Amplitude')
```

ภาพที่ จ2 การใช้คำสั่ง spa บน m-file ของโปรแกรม MATLAB

จากโปรแกรมดังกล่าวได้สั่งให้แสดงข้อมูลบนโดเมนความถี่ออกมาเป็นกราฟที่มีแกนนอนเป็นความถี่หน่วยเป็น rad/s และแกนตั้งเป็นขนาดที่ไร้หน่วย

ในงานวิจัยนี้จะใช้คำสั่ง spa ในการแปลงข้อมูลเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีการตรวจส อบโปรแกรมกับระบบอย่างง่ายที่ทราบฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่แน่นอน โดยใช้ MATLAB Simulink ดังแสดงในภาพที่ จ3 สำหรับจำลองสัญญาณเข้าลักษณะต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย White noise, Unit step และPulse generator แล้ววัดค่าสัญญาณเข้า (U) และสัญญาณออก (Y) นั้นมาใช้เป็นข้อมูลบนโดเมนของเวลาแทนข้อมูลจริง

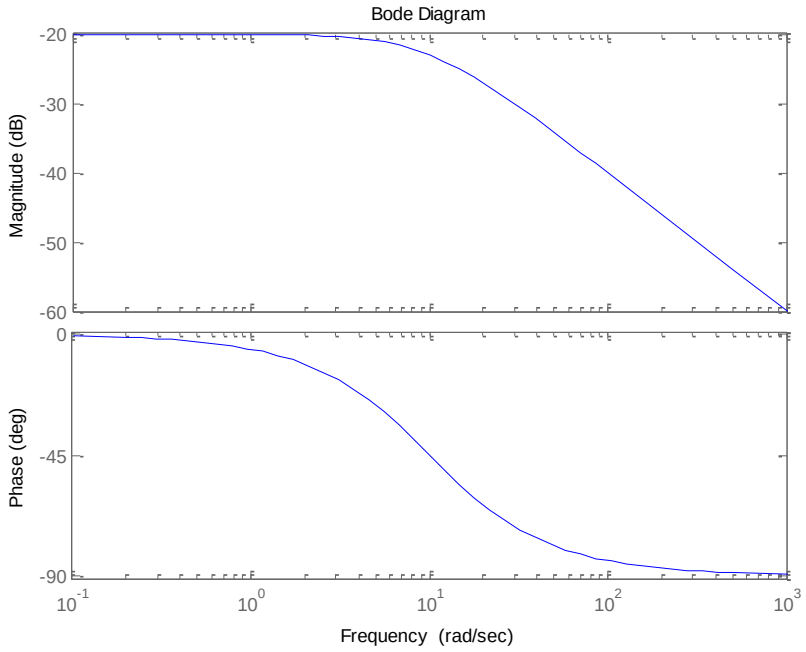


ภาพที่ จ3 แบบจำลองบน MATLAB Simulink

ในการจำลองนี้จะเก็บข้อมูลทุก 0.001 วินาที (Sampling Time) และเก็บเป็นเวลาทั้งหมด 2.5 วินาที ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะมี 2500 ค่าเท่ากับจำนวนข้อมูลจริง

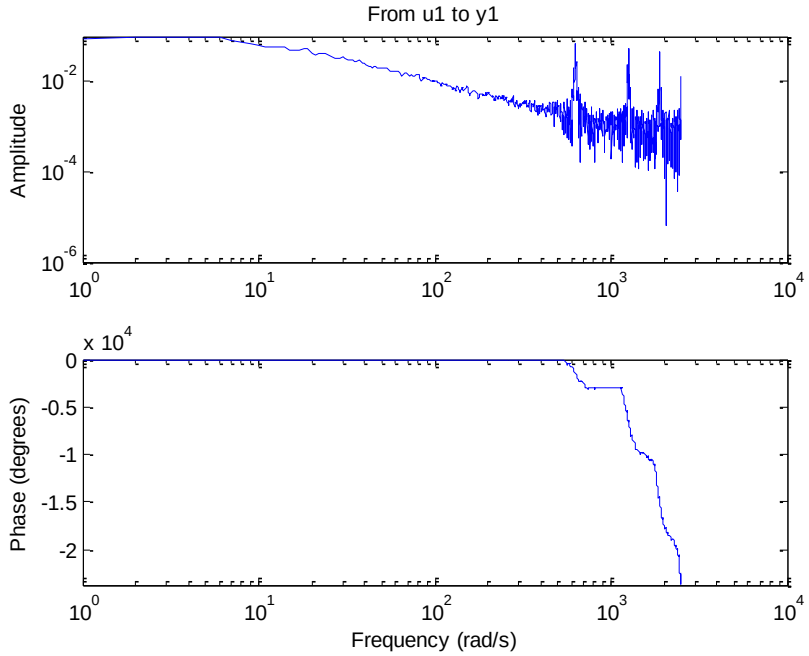
เมื่อกำหนดให้ระบบมีฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 1 ซึ่งมีค่า DC Gain เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ 10 rad/s ดังแสดงในสมการที่ จ1 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้จะมีขนาดและเฟสดังแสดงในภาพที่ จ4

$$G(s) = \frac{0.1}{0.1s + 1} \qquad (จ1)$$

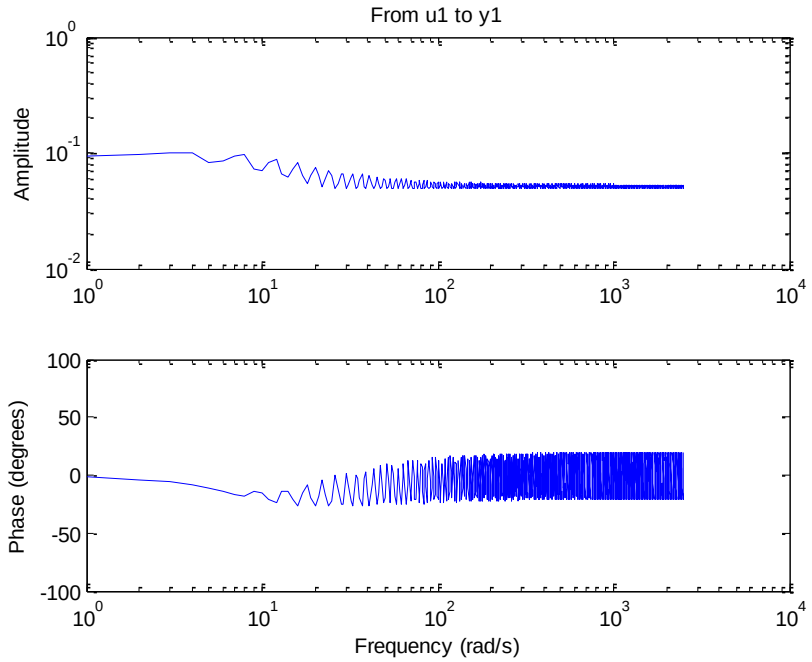


ภาพที่ จ4 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับหนึ่ง

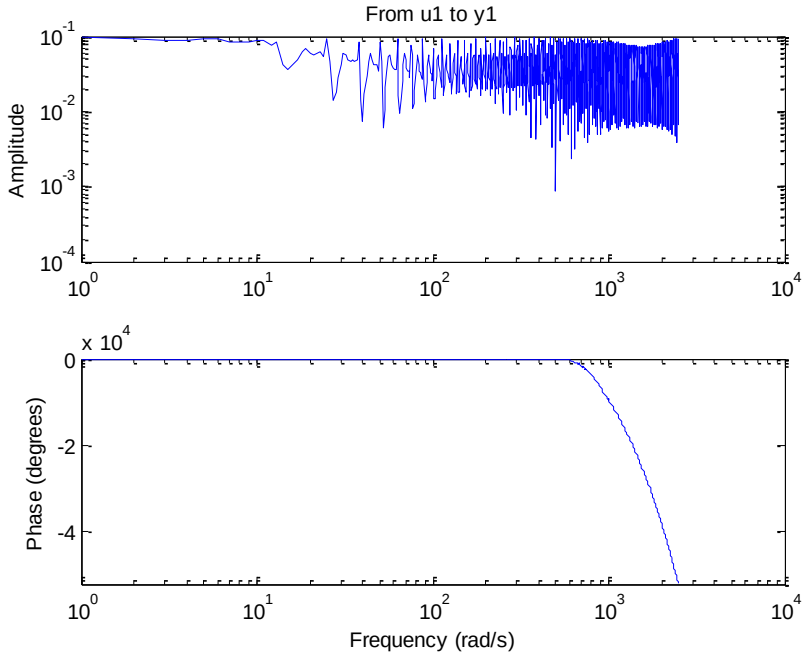
จากการเก็บข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบอันดับหนึ่งที่จำลองสัญญาณเข้าเป็น White noise, Unit step และ Pulse generation ใน MATLAB Simulink แล้วนำมาใช้คำสั่ง spa ดังแสดงโปรแกรมในภาพที่ จ2 พบว่าผลการตอบสนองเชิงความถี่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ จ5, จ6 และ จ7 ตามลำดับ



ภาพที่ จ5 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น White noise



ภาพที่ จ6 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Unit step

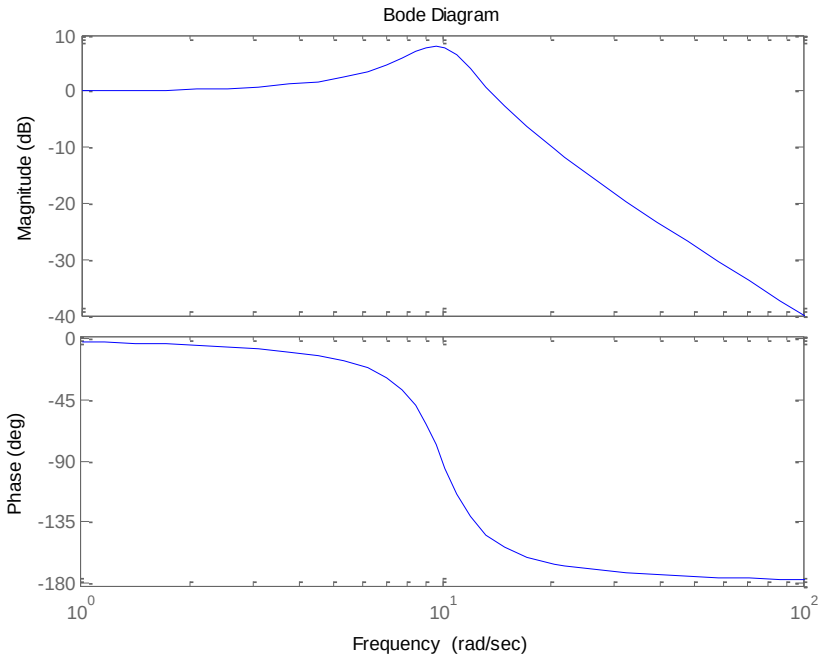


ภาพที่ จ7 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation

เมื่อพิจารณาแนวโน้มกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติกับกราฟซึ่งแสดงภาพที่ จ5, จ6 และ จ 7 ในช่วงความถี่ระหว่าง 1 – 100 rad/s จะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟในอุดมคติ โดยมีตำแ หน่งความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ประมาณ 10 rad/s และค่า DC Gain ประมาณ 0.1 จากกราฟทั้ง 3 จะเห็นว่าผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น White noise จะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนและมีความต่อเนื่องมากที่สุด รองลงมาคือผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น Unit step และ Pulse generation ตามลำดับ โดยผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น White noise และ Unit step ยังอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการนำกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่นี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ส่วนผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation มีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากกราฟในอุดมคติไปมาก ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน จึงไม่ควรนำสัญญาณที่เก็บค่ามาจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็นแบบ Pulse generation มาใช้กับการแปลงข้อมูลด้วยคำสั่ง spa

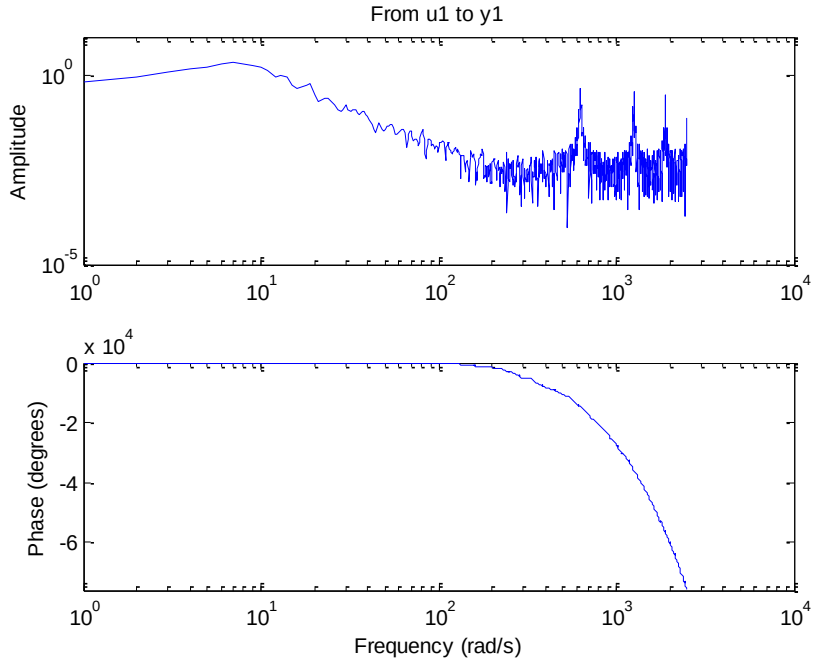
สำหรับระบบมีฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 2 ซึ่งมีค่า DC Gain เท่ากับ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ 10 rad/s ค่าความหน่วงเท่ากับ 0.2 ดังแสดงในสมการที่ จ2 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนนี้จะมีขนาดและเฟสดังแสดงในภาพที่ จ8

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 4s + 100} \qquad (จ2)$$

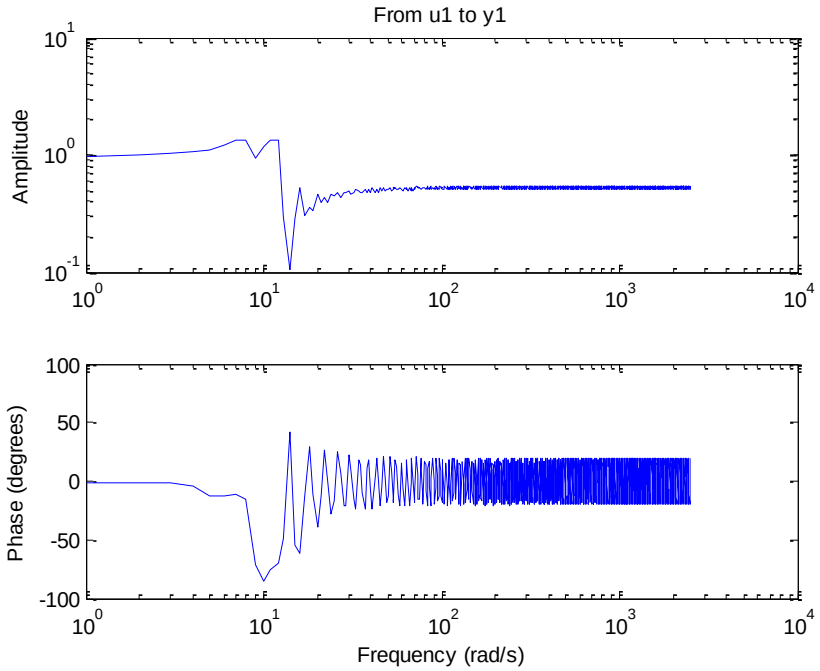


ภาพที่ จ8 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติของฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับสอง

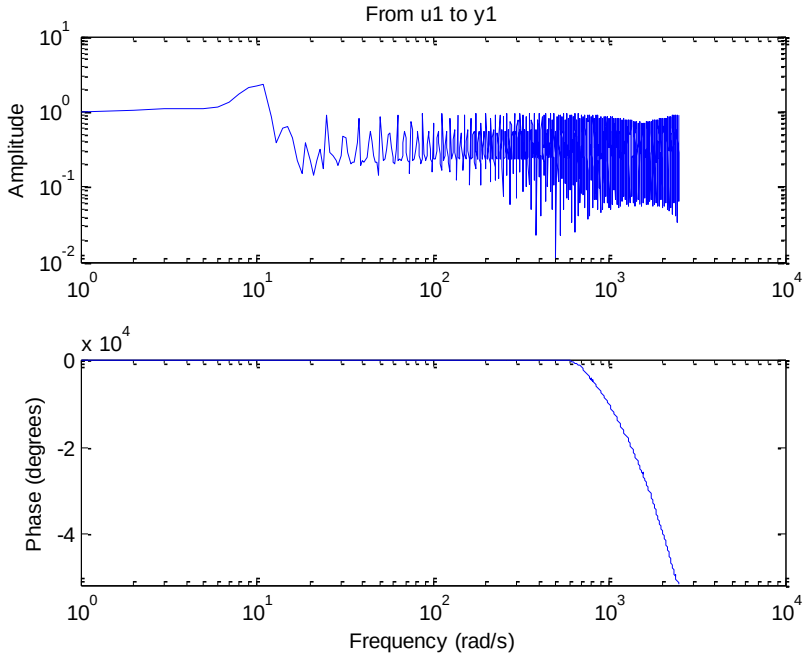
จากการเก็บข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบอันดับหนึ่งที่จำลองสัญญาณเข้าเป็น White noise, Unit step และ Pulse generation ใน MATLAB Simulink แล้วนำมาใช้คำสั่ง spa ดังแสดงโปรแกรมในภาพที่ จ2 พบว่าผลการตอบสนองเชิงความถี่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ จ9, จ10 และ จ11 ตามลำดับ



ภาพที่ จ9 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น White noise



ภาพที่ จ10 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Unit step



ภาพที่ จ11 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation

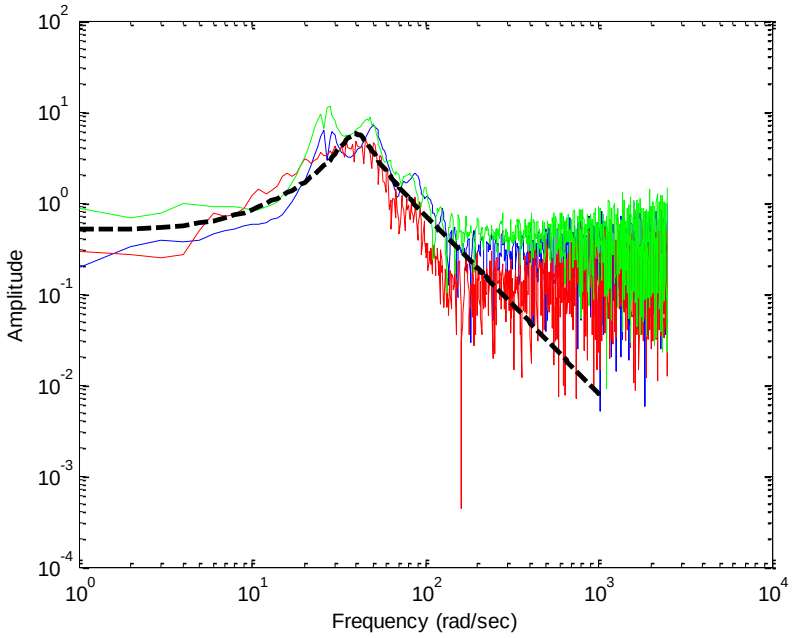
เมื่อพิจารณาแนวโน้มกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ในอุดมคติกับกราฟซึ่งแสดงภาพที่ จ9, จ 10 และ จ11 ในช่วงความถี่ระหว่าง 1 – 100 rad/s จะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟในอุดมคติ โดยมีตำแหน่งความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ประมาณ 10 rad/s และค่า DC Gain ประมาณ 1 จากกราฟทั้ง 3 จะเห็นว่าผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น White noise จะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนและมีความต่อเนื่องมากที่สุด ส่วนผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น Unit step มีแนวโน้มที่ไม่ค่อยคล้ายกับกราฟในอุดมคติแต่กราฟมีความต่อเนื่องตลอดช่วงความถี่ ส่วนผลการตอบสนองเชิงความถี่ที่เกิดจากการจำลองสัญญาณเข้าเป็น Pulse generation มีแนวโน้มตามกราฟในอุดมคติ แต่ในช่วงความถี่เกิน 10 rad/s ค่าขนาดมีการแกว่งอยู่มากซึ่งการแกว่งของค่านี้จะมีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของกราฟการประมาณอย่างมาก

ดังนั้นสัญญาณเข้าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในงานวิจัยและการแปลงข้อมูลคือสัญญาณเข้าเป็นแบบ Unit step เพราะเป็นสัญญาณที่สามารถสร้างในการทดลองได้จริง และเหมาะสำหรับคำสั่งที่ใช้หาผลการตอบสนองเชิงความถี่จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วย

จ.3 การใช้ MATLAB Simulink ในการตรวจสอบการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอน

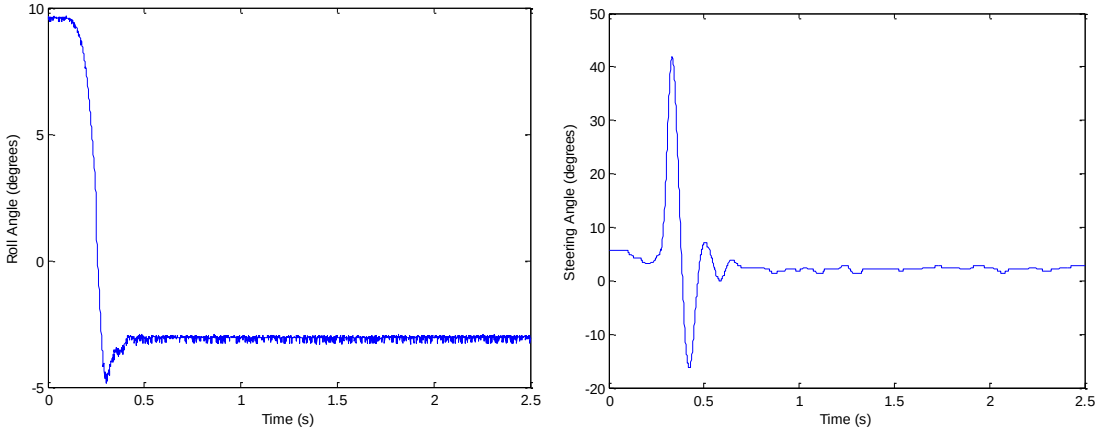
การตรวจสอบฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ทำการประมาณผลการตอบสนองเชิงความถี่ ทำได้โดยให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ประมาณเป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบใน MATLAB Simulink จากตัวอย่างข้อมูลของผู้ทดสอบมีรูปแบบฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังแสดงในสมการที่ จ 1 และลักษณะกราฟการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนดังแสดงในภาพที่ จ12

$$G(s) = (0.5) \times \frac{(\frac{1}{8}s + 1)}{(0.0125s + 1)} \times \frac{(1600)}{(s^2 + 16s + 1600)} \qquad (จ1)$$



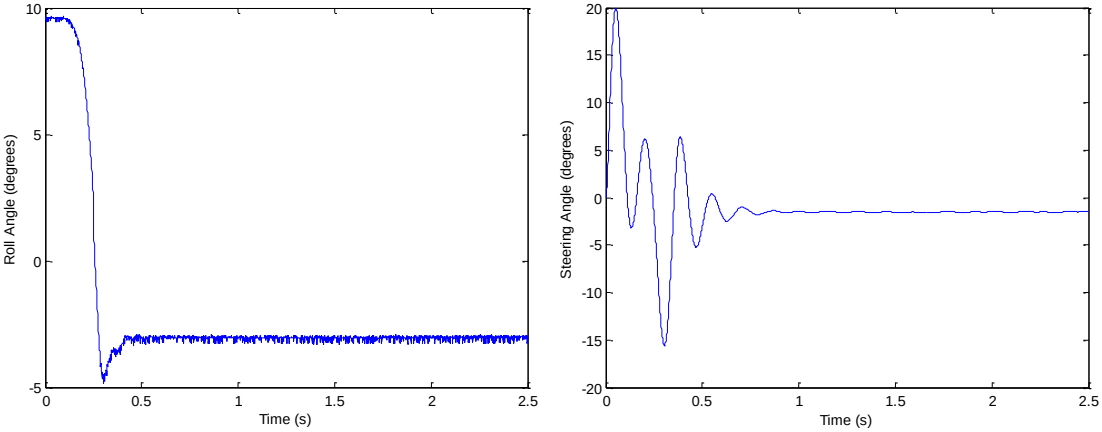
ภาพที่ จ12 กราฟการประมาณฟังก์ชั่นถ่ายโอนอันดับ 3

ในการตรวจสอบจะฟังก์ชั่นถ่ายโอนที่ประมาณเป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ และ ใส่สัญญาณเข้าลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดสัญญาณออกที่เกิดขึ้น แล้วนำมาเปรียบเทียบลักษณะกับกราฟสัญญาณออกวัดได้จริง โดยสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่วัดจริงแสดงในภาพที่ จ13 (a) และ (b) ตามลำดับ ส่วนสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ได้จากการจำลองระบบใน MATLAB Simulink แสดงในภาพที่ จ14 (a) และ (b) ตามลำดับ



(a) (b)

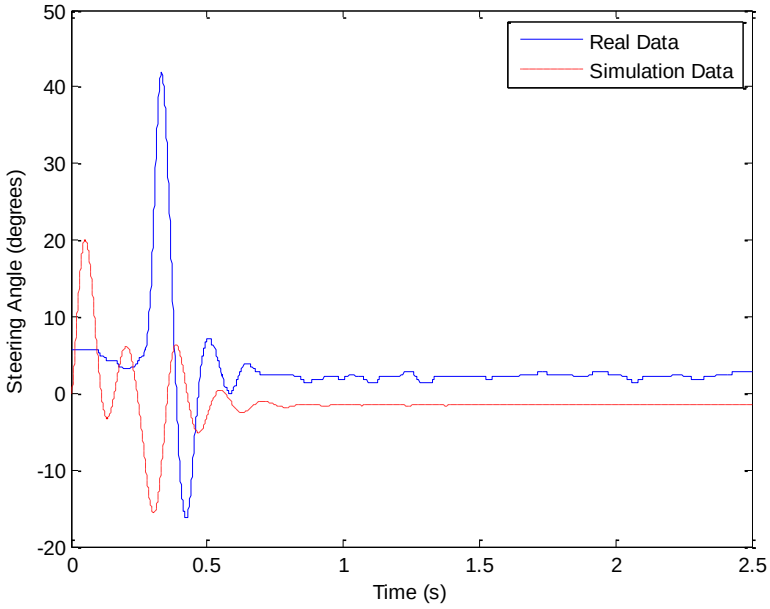
ภาพที่ จ13 สัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่วัดจริง



(a) (b)

ภาพที่ จ14 สัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ได้จากการจำลองใน MATLAB Simulink

จากภาพที่ จ13 และ จ14 เมื่อนำสัญญาณออกที่ได้มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ จ15



ภาพที่ จ15 เปรียบเทียบสัญญาณออกที่ได้จากการวัดจริงและการจำลองโมเดล

จากภาพที่ จ15 จะเห็นว่าลักษณะสัญญาณออกที่ได้จากการทดลองจริงนั้นเกิดที่เวลาช้ากว่าสัญญาณที่ได้จากการจำลอง โดย ช่วงแรกสัญญาณออกนั้นแตกต่างกัน สัญญาณออกจริงเกิดยอดที่สูงกว่าสัญญาณที่ได้จากการจำลองโมเดล และยอดที่เกิดขึ้นนี้เกิดที่คนละเวลา จึงสรุปได้ว่าโมเดลที่จำลองมีความใกล้เคียงกันระดับหนึ่ง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิชญา มนัสวีพงศ์สกุล เกิดเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2532 ณ โรงพยาบาลวิชัยยุทธ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2553 ขณะศึกษาอยู่ในชั้นปีที่ 3 มีโอกาสหาประสบการณ์การทำงาน โดยเข้าฝึกงานในฝ่ายวิจัยและพัฒนา ของบริษัท สมบูรณ์ แอ๊ดวานซ์ เทคโนโลยี จำกัด ส่วนแผนกวิจัยและพัฒนา ในส่วนผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์แผยแพร่ได้แก่ “Driving Simulator for Low Frequency Ride Comfort Test (Part 1 : Structure and Motion Design)” ในงานประชุมทางวิชาการ The International Conference of Automotive Technology for Young Engineers ที่จังหวัดโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2554 “Development of Driving Simulator for Low Frequency Ride Comfort Test (Part 1 : Structure and Motion Design)” ในงานประชุมทางวิชาการ The 7th International Conference on Automotive Engineering (ICAE-7) ที่อิมแพคเมืองทองธานี กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ.2554 และ “Design of Driving Simulator fir Studying Vehicle Rollover” ในงานประชุมทางวิชาการ The 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering ที่จังหวัดกระบี่ ประเทศไทย เมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2554