



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับ
โดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์

LQG CONTROL FOR AN ACTIVE SUSPENSION SYSTEM
BASE ON A FULL CAR MODEL

อดุลย์ พัฒนภักดี

โอบาส โคมลวัฒนาพาณิชย์

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

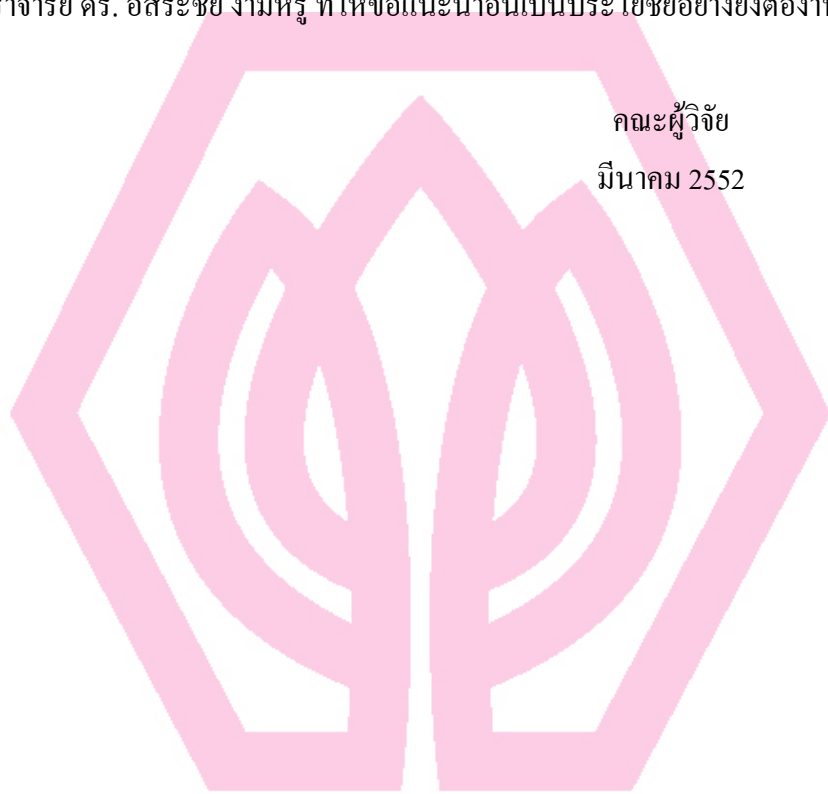
ปีการศึกษา 2550

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีปทุม คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยศรีปทุมมา ณ โอกาสนี้ และ ขอขอบคุณ ท่านผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก รองศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหรรุ ที่ให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย

มีนาคม 2552



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย : การควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้
แบบจำลองเต็มของรถยนต์
ผู้วิจัย : นายอดุลย์ พัฒนภักดี และนายโอภาส โกมลวัฒนาพาณิชย์
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2552

บทคัดย่อ

ระบบรองรับกันสะเทือน เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในรถยนต์ซึ่งนอกจากจะมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักของตัวรถและลดการสั่นสะเทือนแล้ว ยังเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้สมรรถนะในการขับขี่ดีขึ้น

ระบบรองรับกันสะเทือนแบบ Active Suspension System จะเป็นระบบรองรับกันสะเทือนที่เพิ่มอุปกรณ์ควบคุมแรงเข้าไปในระบบรองรับกันสะเทือน เปรียบเสมือนกับการทำให้ค่าคงที่ของสปริงและหรือตัวหน่วงปรับค่าได้ โดยค่าที่ปรับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับสภาพการเปลี่ยนแปลงของถนน และน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลของตัวรถดีขึ้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาถึงการใช้ระบบควบคุมแบบ LQG ในการควบคุมระบบรองรับกันสะเทือนเพื่อเปรียบเทียบผลกับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม โดยอาศัยการจำลองการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สำหรับแบบจำลองเต็มของรถยนต์ ผลจากการจำลองภายใต้เงื่อนไขสภาพถนนเป็นแบบ Impulse Road Profile พบว่าค่าสูงสุดของ Vertical Position, Pitch Angle, และ Roll Angle มีค่าลดลง 97.0%, 81.9%, และ 55.5% ตามลำดับสำหรับระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG และสำหรับกรณีของสภาพถนนเป็นแบบ Sine Road Profile พบว่าค่า RMS error ของ Vertical Position, Pitch Angle, และ Roll Angle มีค่าลดลง 88.6%, 92.3%, และ 43% ตามลำดับสำหรับระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

คำสำคัญ : ตัวควบคุมแบบ LQG ระบบรองรับกันสะเทือนแบบ Active suspension ตัวกรองคาลมานแบบขยาย

Research Title : LQG Control for an Active Suspension Systems Based on a Full-Car Model

Name of Researchers : Mr.Adual Pattanapukdee and Mr.Opart Gomonwattanapanich

Name of Institution : Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University

Year of Publication : B. E. 2552

ABSTRACT

The suspension system must support the vehicle, provide directional control, provide handling stability, and also provide ride comfort from road disturbances.

An active suspension system has the ability to store, dissipate and to introduce energy to the system. It may vary its parameters such as the spring constant, the damping coefficient by adding the control force depending upon operating conditions and the road condition.

In this research, the active suspension systems for the full car model with the LQG controller have been studied. The output variable are vertical position, pitch angle, roll angle and the disturbances is a road signal. The system under various conditions has been simulated by computer program, and the performances of the system are evaluated by comparative method.

The performance indices, maximum value and Root Mean Square of error (RMS Error), are used to analyze the system performances. The study shows that the performances of system with LQG controller are better than the system without controller. For the impulse road profile, the maximum value is decrease 97.0%, 81.9%, and 55.5% for the Vertical Position, the Pitch Angle, and the Roll Angle, respectively. For the sine road profile, the RMS Error is decrease 88.6%, 92.3%, and 43.0% for the Vertical Position, the Pitch Angle, and the Roll Angle, respectively.

Keywords : LQG Controller, Active Suspension, Extended Kalman Filter

สารบัญ

บทที่

หน้า

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3	คำถามการวิจัย	2
1.4	สมมุติฐานการวิจัย	2
1.5	ขอบเขตของการวิจัย	2
1.6	นิยามศัพท์เฉพาะ	3
2	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย.....	5
2.2	ทฤษฎีที่รองรับเรื่องวิจัย.....	14
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3	ระเบียบวิธีการวิจัย	22
3.1	รูปแบบการวิจัย หรือแบบแผนการวิจัย	22
3.2	ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	23
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.4	เครื่องมือการวิจัย	24
3.5	การรวบรวมข้อมูล	25
3.6	การวิเคราะห์ข้อมูล	25
3.7	การสรุปผลและนำเสนองานวิจัย.....	25
3.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและตัวควบคุม.....	26
4	ผลการจำลองการทำงานระบบด้วยคอมพิวเตอร์.....	33
4.1	ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	33
4.2	กรณีศึกษาจากการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์.....	34
4.3	รูปแบบการนำเสนอข้อมูล.....	35
4.4	ตัวอย่างการนำเสนอข้อมูล.....	36

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	45
5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับกรณีของ Impulse Road Profile.....	45
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับกรณีของ Sine Road Profile.....	50
6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	56
6.1 สรุปผลการวิจัย	56
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก กราฟข้อมูลการจำลองการทำงานของระบบ ด้วยคอมพิวเตอร์	63
ภาคผนวก ข โปรแกรมจำลองการทำงาน MATLAB	84
ภาคผนวก ค แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ	112
ประวัติย่อผู้วิจัย	117

สารบัญตาราง

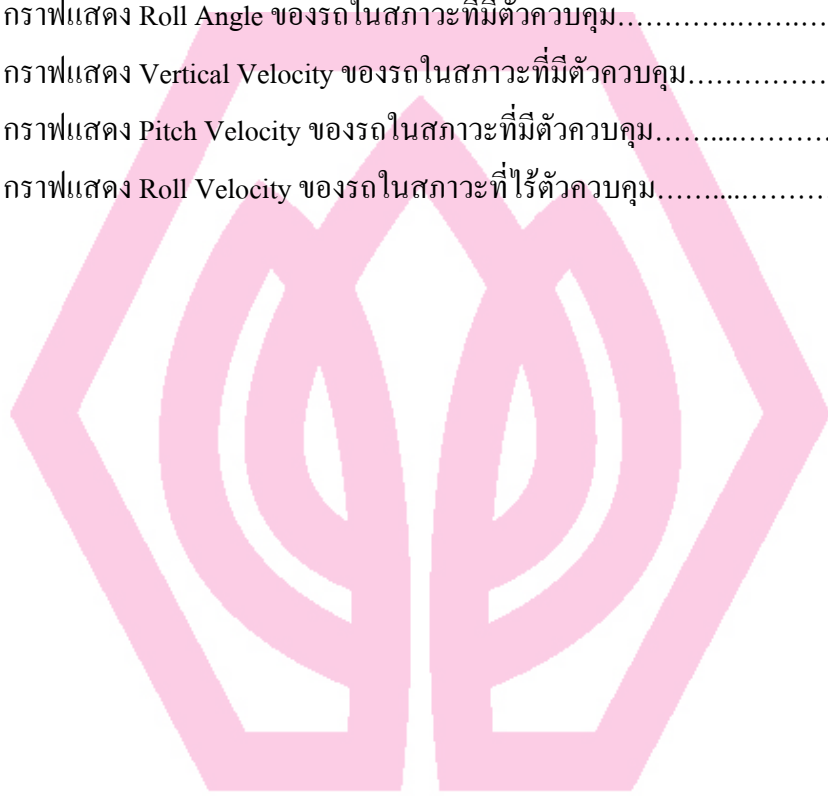
ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Vertical Position.....	45
5.2 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Vertical Velocity.....	46
5.3 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Pitch Angle.....	47
5.4 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Pitch Velocity	47
5.5 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Roll Angle.....	48
5.6 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Roll Velocity	49
5.7 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Vertical Position.....	50
5.8 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Vertical Velocity.....	50
5.9 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Pitch Angle.....	52
5.10 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Pitch Velocity	52
5.11 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Roll Angle.....	54
5.12 ค่าธรรมเนียมชีวิตของระบบ สำหรับ Roll Velocity	54

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง.....	5
2.2 แสดงระบบกันสะเทือนแบบอิสระ.....	6
2.3 แสดงทิศทางการสั่นสะเทือนของรถยนต์.....	7
2.4 แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบปิด.....	8
2.5 ผลตอบสนองของ Second Order System ต่อสัญญาณอินพุทแบบ Unit Step Signal.....	9
2.6 แสดง Rise Time, Settling Time, Peak Time, และ Percent Overshoot.....	10
2.7 แสดงรูปทั่วไปของ Closed-loop Feedback Control System.....	11
2.8 แสดง Feedback Control System ที่รวมสัญญาณรบกวน (Disturbance: $D(s)$).....	12
2.9 แสดง Feed-Forward Compensation [$Gcd(s)$].....	13
2.10 แสดงแบบจำลองของรถยนต์.....	14
3.1 แสดงแบบจำลองเต็มของรถยนต์ (ซ้ำ).....	22
3.2 แสดง Block Diagram อย่างง่ายของระบบ.....	23
3.3 แสดงแผนผังของ LQG controller.....	32
4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ถูกควบคุม (Plant).....	33
4.2 แสดงแบบจำลองเต็มของรถยนต์ (ซ้ำ).....	34
4.3 กราฟแสดง Impulse Road Profile.....	36
4.4 กราฟแสดง Impulse Road Profile (ขยาย).....	37
4.5 กราฟแสดง Impulse Disturbance Signal ของล้อหน้าและล้อหลัง.....	37
4.6 กราฟแสดง Impulse Disturbance Signal ของล้อหน้าและล้อหลัง (ขยาย).....	38
4.7 กราฟแสดง Vertical Displacement ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	39
4.8 กราฟแสดง Pitch Angle ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	39
4.9 กราฟแสดง Roll Angle ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	40
4.10 กราฟแสดง Vertical Velocity ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	40
4.11 กราฟแสดง Pitch Velocity ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	41
4.12 กราฟแสดง Roll Velocity ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	41
4.13 กราฟแสดง Vertical Displacement ของรถในสถานะที่มีตัวควบคุม.....	42

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.14 กราฟแสดง Pitch Angle ของรถในสถานะที่มีตัวควบคุม.....	42
4.15 กราฟแสดง Roll Angle ของรถในสถานะที่มีตัวควบคุม.....	43
4.16 กราฟแสดง Vertical Velocity ของรถในสถานะที่มีตัวควบคุม.....	43
4.17 กราฟแสดง Pitch Velocity ของรถในสถานะที่มีตัวควบคุม.....	44
4.18 กราฟแสดง Roll Velocity ของรถในสถานะที่ไร้ตัวควบคุม.....	44



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรองรับกันสะเทือน (Suspension System) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในรถยนต์ซึ่งนอกจากจะมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักของตัวรถและลดการสั่นสะเทือนแล้ว ยังเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้สมรรถนะในการขับขี่ดีขึ้น ในการออกแบบระบบรองรับกันสะเทือนจะต้องคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากสภาพถนน น้ำหนักบรรทุก และความนุ่มนวลในการขับขี่

ระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม (Passive Suspension System) ซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง(Damper) จะถูกออกแบบเพื่อรองรับผลกระทบเนื่องจากสภาพถนน น้ำหนักบรรทุก และความนุ่มนวลในการขับขี่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง เพื่อทำการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่คงที่ให้กับสปริงและตัวหน่วง ดังนั้นระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุมจะไม่สามารถให้ผลที่ดีในการขับขี่ที่สภาพถนนมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รวมทั้งผลกระทบในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกมีการเปลี่ยนแปลง

ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุม (Active Suspension System) จะเป็นระบบรองรับกันสะเทือนที่เพิ่มอุปกรณ์ควบคุมแรงเข้าไปในระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุมเปรียบเสมือนกับการทำให้ค่าคงที่ของสปริงและหรือตัวหน่วงปรับค่าได้ โดยค่าที่ปรับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับสภาพการเปลี่ยนแปลงของถนน และน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลของตัวรถดีขึ้น

การควบคุมสำหรับระบบรองรับกันสะเทือนที่ดี จะเพิ่มสมรรถนะในการขับขี่รถยนต์ให้ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาถึงการใช้ระบบควบคุมแบบ LQG ในการควบคุมระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบผลกับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาารบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบ LQG (Linear quadratic Gaussian) ซึ่งเป็นเทคนิคควบคุมรูปแบบหนึ่ง สำหรับทฤษฎีการควบคุมแบบออปติมัล (Optimal Control Theory) ซึ่งเทคนิคควบคุมแบบ LQG จะสามารถเลือกรูปแบบของพรีนซิเบิลเกนและรีเทิร์นเรโซของระบบ (Principle gains and return ratio) สำหรับควบคุมตัวแปรอินพุท หรือ

1.3 คำถามการวิจัย

ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมสำหรับยานยนต์ จะเป็นระบบรองรับกันสะเทือนที่จะเข้ามาแทนที่ระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุมในอนาคต ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมเปรียบเสมือนกับการทำให้ค่าคงที่ของสปริงและหรือตัวหน่วงปรับค่าได้ โดยค่าที่ปรับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับสภาพการเปลี่ยนแปลงของถนน และน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลของตัวรถดีขึ้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาถึงการใช้ระบบควบคุมแบบ LQG ในการควบคุมระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมสำหรับยานยนต์ เพื่อผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนว่าลดลงเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนสำหรับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม

1.4 สมมติฐานการวิจัย

ระบบควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมสำหรับยานยนต์ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลของยานยนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 กลุ่มเป้าหมายหรือประชากร

ข้อมูลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ หรือ ข้อมูลจากการทดลอง

1.5.2 เนื้อหาของการวิจัย

1.5.2.1 ศึกษา และออกแบบ

ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับระบบรองรับการสั่นสะเทือน สมการทางคณิตศาสตร์และรูปแบบจำลองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนสำหรับยานยนต์ การออกแบบตัวควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่มีตัวควบคุมของยานยนต์ ผลตอบสนองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุมเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

1.5.2.2 จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้ เป็นการใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการทำงานของระบบ เพื่อดูผลตอบสนองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุมเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบ LQG โดยทำการจำลองสถานการณ์ในการขับขี่ยานยนต์ภายใต้เงื่อนไขของถนนและสภาพสิ่งแวดล้อมยานยนต์ในสถานะที่แตกต่างกัน

1.5.2.3 วิเคราะห์ข้อมูล

เป็นการวิเคราะห์และสรุปผล โดยอาศัยข้อมูลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

1.5.3 ระยะเวลา

1 ปี 7 เดือน (สิงหาคม 2550-มีนาคม 2552)

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

ระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม (Passive Suspension System) เป็นระบบรองรับกันสะเทือนในรถยนต์ที่ค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงถูกออกแบบให้คงที่ไม่สามารถปรับค่าได้

ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุม (Active Suspension System) เป็นระบบรองรับกันสะเทือนในรถยนต์ที่เพิ่มแรงเพิ่มเติมเข้าไปในระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม เพื่อปรับค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วง

สปริงเวท (Sprung weight) หมายถึงน้ำหนักที่ถูกรองรับด้วยสปริง ซึ่งจะประกอบด้วยตัวถังและส่วนประกอบอื่น ๆ (คนขับ น้ำหนักบรรทุก)

อันสปริงเวท (Unsprung weight) หมายถึงน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับด้วยสปริงซึ่งจะประกอบด้วยล้อ เพลา และส่วนอื่น ๆ ของช่วงล่าง

ระบบควบคุมแบบ LQG คือระบบควบคุมที่สัญญาณควบคุมถูกออกแบบให้เป็นไปตามเงื่อนไขของ Linear Quadratic Gaussian

ความไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinearity) คือ ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรตาม และ ตัวแปรอิสระ ที่มีกำลังไม่เป็นหนึ่ง

เวลาหน่วง (Time Delay) คือ เวลาความล่าช้าของระบบ ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เข้าสู่ระบบ

Steady State Error คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง สัญญาณทางออก และ สัญญาณทางเข้าของระบบ เมื่อระบบ อยู่ในสภาวะคงตัว

Multivariable System หรือ Multi-Input, Multi-Output (MIMO) System หมายถึงระบบที่มีอินพุตมากกว่าหนึ่งอินพุตและมีเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งเอาต์พุต

Principal Gain หมายถึง singular values ของฟังก์ชัน $G(s)$ โดยที่ $s = j\omega$ ($0 \leq \omega < \infty$) โดยที่ค่าของ singular values ทั้งหมดของ $G(\omega)$ จะเป็นฟังก์ชันของ ω

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 2

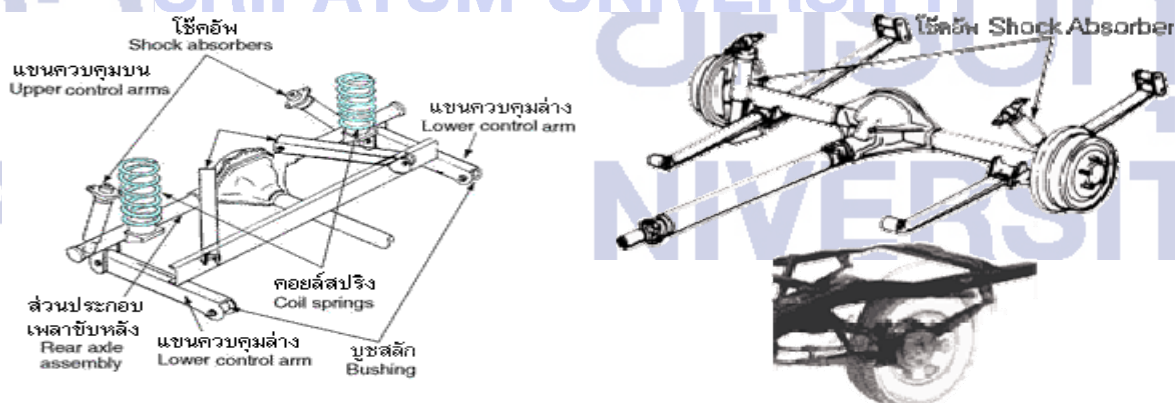
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรื่องที่วิจัย

2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบรองรับการสั่นสะเทือน

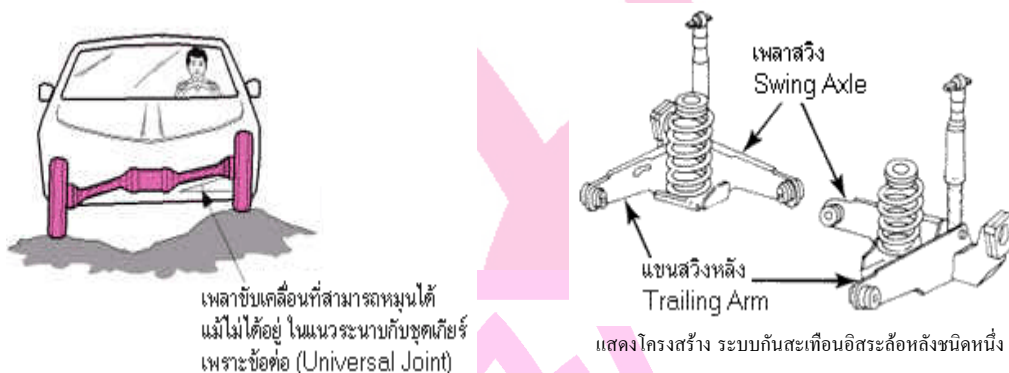
ระบบกันสะเทือน ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถ เครื่องยนต์ ผู้โดยสาร และสิ่งของใดๆ ที่อยู่ในรถ อีกทั้ง ยังช่วยรองรับ แรงสะเทือนจากสภาพพื้นผิวถนน ด้วยเหตุนี้รถยนต์โดยทั่วไปจึงต้องมีระบบรองรับน้ำหนักเชื่อมต่ออยู่ระหว่างตัวถังกับล้อรถ เพื่อทำหน้าที่ดูดซับการสั่นสะเทือน อาการส่าย และอาการกระแทกที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวถนน ซึ่งจะมีผลที่ทำให้ผู้โดยสารและสัมภาระที่บรรทุกได้รับความปลอดภัยและมีเสถียรภาพในการขับขี่ที่ดีและยังช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ อีกด้วย อุปกรณ์ รองรับน้ำหนักที่สำคัญในระบบกันสะเทือนคือ สปริง (Spring) และ โช้คอัพ (Shock Absorber)

ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง (Rigid Suspension) เป็นระบบกันสะเทือนแบบดั้งเดิม โดยมากจะพบกับระบบขับเคลื่อนล้อหลัง เพราะจะมีเพลาหมุน (Axle shaft) ต่อกันออกจากชุดเฟืองท้าย (Differential) ไปสู่ล้อซ้าย และล้อขวาโดยตรง โดยไม่ผ่านข้อต่ออ่อน (Universal Joint) ดังนั้นเฟืองท้าย เพลาขับล้อซ้าย และเพลาขับล้อขวา และบริเวณเพลาขับทั้ง 2 ข้าง จะมีสปริง และโช้คอัพรองรับน้ำหนัก และแรงสะเทือนจากถนน เมื่อล้อซ้ายได้รับแรงสะเทือนใดๆ ก็จะทำให้สะเทือนแรงสะเทือนนี้ ไปยังล้ออีกข้างหนึ่งด้วย



ภาพประกอบ 2.1 แสดงระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง

ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension) เป็นระบบกันสะเทือนที่ได้รับการพัฒนาให้แยกหน้าที่ รองรับน้ำหนัก และแรงสะเทือนระหว่างล้อซ้าย และล้อขวาออกจากกัน เมื่อล้อใดล้อหนึ่งตกหลุมหรือกระทะกึ่งกีดขวาง แรงสะเทือนที่เกิดขึ้น ก็จะกระทำต่อล้อนั้นเสียส่วนใหญ่ และจะส่งแรงสะเทือนนี้ไปสู่ตัวรถ และอุปกรณ์ต่อเนื่องกันให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดความนุ่มนวลในห้องโดยสารมากที่สุด



ภาพประกอบ 2.2 แสดงระบบกันสะเทือนแบบอิสระ

รถที่ขับเคลื่อนล้อหน้า หรือขับเคลื่อนล้อหลัง ที่ใช้ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ จะมีข้อต่ออ่อน (Universal Joint) อยู่ระหว่างเพลลาขับ ไปจนถึงล้อ เพื่อที่ว่า เวลาล้อเคลื่อนที่ไปตามสภาพถนนแล้ว เกิดตกหลุม หรือข้ามสิ่งกีดขวางใดๆ จุดศูนย์กลางของล้อจะไม่ตรงกับแกนเพลลาหมุน ข้อต่ออ่อน ก็ยังคงส่งแรงหมุนนี้ไปตามเพลลาหมุน ไปจนถึงล้อ ได้ แม้ว่าสภาพถนนจะเป็นอย่างไรก็ตาม

การสั่นสะเทือนของรถยนต์ จะเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากน้ำหนักที่ถูกรองรับด้วยสปริง (Sprung weight) ซึ่งจะประกอบด้วยตัวถังและส่วนประกอบอื่น ๆ (คนขับ น้ำหนักบรรทุก) และ น้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับด้วยสปริง (Unsprung weight) ซึ่งจะประกอบด้วยล้อ เฟลา และส่วนอื่น ๆ ของช่วงล่าง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าถ้ามีน้ำหนักที่อยู่เหนือสปริงมากกว่า จะทำให้การขับขี่เกิดความนุ่มนวล และมีเสถียรภาพที่ดีกว่า เป็นสาเหตุให้ช่วยลดแรงเหวี่ยงและแรงกระทะของตัวถัง และในทางตรงกันข้าม ถ้ามีน้ำหนักที่อยู่ใต้สปริงมีมากกว่า ก็จะเป็นสาเหตุทำให้ตัวถังรถเกิดการโคลงและการสั่นสะเทือน เป็นผลให้การขับขี่ไม่สะดวกสบายเช่นกัน

ดังนั้นอาการสั่นสะเทือนและการโคลงของตัวถังรถสามารถจำแนกออกได้ ดังนี้

1. อาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสปริงเวท จะทำให้เกิดอาการขึ้นกับตัวถังดังต่อไปนี้

ก. การกระดอน (Pitching) เป็นอาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในลักษณะขึ้นลงของด้านหน้า และด้านหลังของตัวถังรถยนต์ โดยจะมีความสัมพันธ์กับศูนย์กลางของตัวถัง อาการที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสภาพถนนที่เป็นหลุมเป็นบ่อ หรือสปริงอ่อน

ข. การโคลงตัว (Rolling) เป็นอาการที่เกิดจากการยึดตัวของสปริงด้านหนึ่งและอีกด้าน ยึดตัวเมื่อเลี้ยวรถหรือถนนเป็นหลุม จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการโคลงตัวของตัวถังขึ้น

ค. การเต็น (Bouncing) เป็นอาการเคลื่อนตัวขึ้นลงของตัวถังรถทั้งคัน ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการกระดอน สาเหตุเกิดจากรถวิ่งด้วยความเร็วสูงบนถนนที่เป็นคลื่น

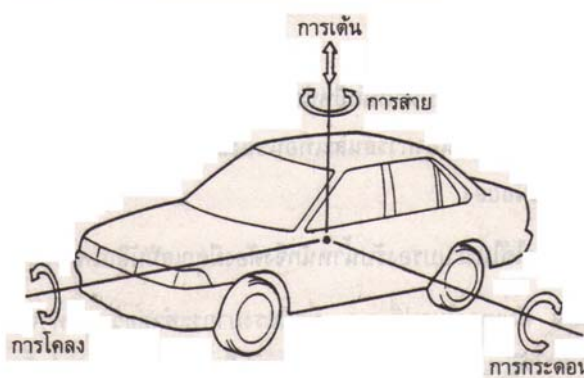
ง. การส่าย (Yawing) เป็นอาการเคลื่อนตัวขึ้นลงของตัวถังรถที่ส่ายไปทางด้านซ้ายและขวา ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางถ่วงของรถ อาการส่ายจะเกิดขึ้นพร้อมกับการกระดอนไปด้วย

2. อาการสันสะเทือนที่เกิดจากอันสปริงเวท จะทำให้เกิดอาการดังต่อไปนี้

ก. การกระโดด (Hopping) เป็นอาการที่เกิดจากล้อรถเต้นขึ้นลง ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบนถนนที่เป็นลูกคลื่นและขับด้วยความเร็วสูง

ข. การกระดอน (Tramping) เป็นอาการสันสะเทือนของล้อรถทั้งด้านซ้ายและด้านขวา เป็นสาเหตุทำให้ล้อเกิดอาการเต้นบนพื้นถนน อาการกระดอนของล้อมักจะเกิดขึ้นได้โดยง่ายกับรถยนต์ที่ใช้ระบบรองรับแบบคานแข็ง

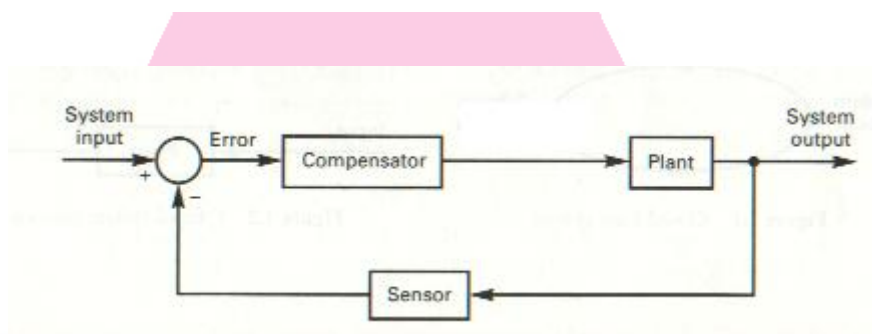
ค. การม้วนตัวของแหนบ (Wind up) เป็นอาการที่เกิดจากแหนบสปริงพยายามที่จะม้วนตัวเองไปรอบ ๆ เฟลา ซึ่งเป็นผลมาจากแรงบิดในขณะที่ขับเคลื่อนของเฟลา



ภาพประกอบ 2.3 แสดงทิศทางการสันสะเทือนของรถยนต์

2.1.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบควบคุม

ระบบควบคุมแบบปิด(Closed-loop Feedback Control System) โดยทั่วไป มีแผนผัง (Block Diagram) ดังแสดง ในภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบปิด

โดยทั่วไประบบควบคุมแบบปิดจะประกอบไปด้วยส่วนของ System Input, System Output, Plant (ส่วนที่เราต้องการควบคุม), Sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เราใช้สำหรับวัดค่าของตัวแปรหรือ ปริมาณที่เราต้องใช้ในการควบคุมและ Compensator หรือ Controller ซึ่งเป็นส่วนที่เราเพิ่มเติมเข้าไปในระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม โดยปกติทั่วไปสำหรับระบบควบคุมที่เราพบเห็นได้บ่อย ถ้าวัตถุประสงค์หลักของการควบคุมเป็นการรักษาค่าของตัวแปรหรือปริมาณบางค่าให้มีค่าคงที่ เมื่อมีสิ่งเข้ามารบกวน ระบบ (Disturbance) เราจะเรียกระบบควบคุมแบบนี้ว่า Regulator ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งของระบบควบคุมเราเรียกชื่อว่า Servomechanism สำหรับระบบควบคุมแบบนี้จะเป็น ลักษณะของการติดตามสัญญาณหรือปริมาณที่ต้องการ (Follow or Tracking) ตามฟังก์ชันของเวลา

2.1.2.1 พฤติกรรมของระบบควบคุม

สำหรับรูปแบบทั่วไปของ First Order System จะมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในรูปแบบ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \text{ และมีผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตที่เป็น Unit Step Signal เป็น}$$

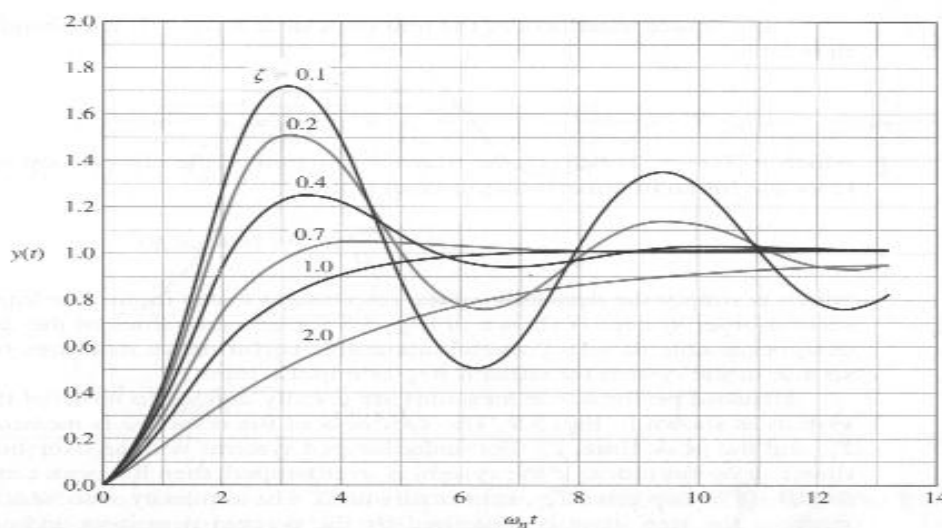
$$y(t) = K(1 - e^{-(t/\tau)}) \text{ โดยที่คุณสมบัติของ First Order System จะขึ้นอยู่กับค่า Gain K และ ค่า}$$

Time Constant (τ) ของระบบ

สำหรับรูปแบบทั่วไปของ Second Order System จะมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในรูปแบบ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

โดยที่ ξ คือค่า Damping Ratio ของระบบ และ ω_n เป็นค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural Frequency) สำหรับตำแหน่งของ Poles ของระบบ Second Order System จะขึ้นอยู่กับค่า Damping Ratio (ξ) ของระบบ กล่าวคือเมื่อ Damping Ratio (ξ) = 0 ค่าของรากของสมการ s_1, s_2 จะเป็นจำนวนเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับ $\pm \omega_n j$ (เรียกชื่อว่า Un-Damped) และเมื่อ Damping Ratio (ξ) = 1 ค่าของรากของสมการ s_1, s_2 จะเป็นจำนวนจริงค่าเดียวกัน นั่นคือ $s_1, s_2 = -\omega_n$ (Critical Damped) และกรณีที่ Damping Ratio (ξ) > 1 ค่าของรากของสมการ s_1, s_2 จะเป็นจำนวนจริง (Over Damped) สำหรับกรณีที่ Damping Ratio (ξ) < 1 ค่าของรากของสมการ s_1, s_2 จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Under Damped) ทั้งนี้ผลตอบสนองของ Second Order System ต่อสัญญาณอินพุตแบบ Unit Step Signal จะแสดงดังภาพประกอบที่ 2.5

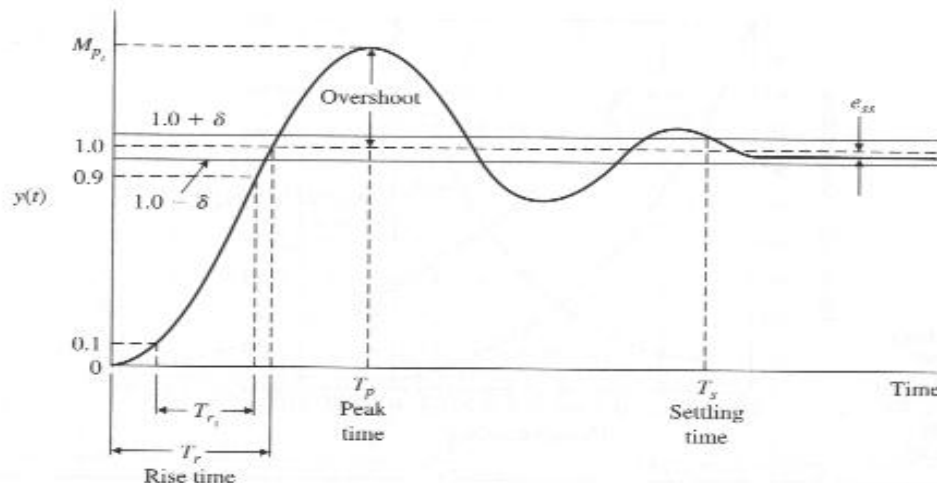


ภาพประกอบ 2.5 ผลตอบสนองของ Second Order System ต่อสัญญาณอินพุตแบบ Unit Step Signal

2.1.2.2 Rise Time, Settling Time, Peak Time, และ Percent Overshoot

ในการวัด The Performance of Feedback Control System สำหรับกรณีของ Unit Step Input Signal เรานิยามปริมาณขึ้นมาเพื่อวัด The Performance ของระบบซึ่งประกอบไปด้วยค่า Rise

Time, Settling Time, Peak Time, และ Percent Overshoot ซึ่งแสดงดังรายละเอียดในภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 แสดง Rise Time, Settling Time, Peak Time, และ Percent Overshoot

Rise Time เป็นปริมาณที่ใช้วัดความเร็วของระบบ ซึ่งมีอยู่สองแบบ คือ 0-100% Rise Time (T_r) และ 10-90% Rise Time (T_{r1}) ถ้าระบบมีค่า Rise Time น้อยแสดงว่าระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันระบบใดมีค่า Rise Time มากแสดงว่าระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการช้าโดยทั่วไป ค่าของ Rise Time จะขึ้นอยู่กับค่าของ Damping Ratio (ζ) และค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural Frequency: ω_n)

Peak Time เป็นระยะเวลาที่ใช้จากจุดเริ่มต้นจนค่าของ Response มีค่าสูงสุด สำหรับ Second Order System ค่าของ Peak Time (T_p) จะหาได้จากความสัมพันธ์ $T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ และ เช่นเดียวกันสำหรับขนาดสูงสุดของ Response (Peak Response: M_{pt}) ก็หาได้จากความสัมพันธ์

$$M_{pt} = 1 + e^{(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})}$$

Percent Overshoot เป็นค่าหรือปริมาณที่ใช้วัดค่าของ Response ที่เกินจากค่าที่เราต้องการเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยที่เรานิยาม Percent Overshoot (P.O.) ว่าคือ $P.O. = \frac{M_{pt} - f_v}{f_v} * 100\%$ เมื่อ f_v เป็น

ค่า Final Value of the Response (โดยทั่วไป f_v มักหมายถึงค่าของ Steady-State Response หรือ คือ ค่าของ Input; จากภาพประกอบที่ 2.6 ค่าของ $f_v = 1$)

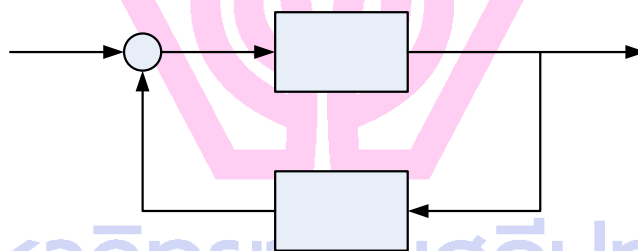
Settling Time (T_s) เรานิยาม Settling Time ว่าเป็นค่าของเวลาที่ใช้จนระบบอยู่ตัว (Settle) ภายในค่าเบี่ยงเบน (δ) ที่เรากำหนด [ดูภาพประกอบที่ 2.6 ประกอบ] สำหรับ Second Order System ในกรณีของ Unit Step Input Signal ถ้าเรายึดค่าเบี่ยงเบนที่ 2% ค่าโดยประมาณของ Settling Time มี

$$\text{ค่าประมาณ } T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} = 4\tau$$

จากนิยามของปริมาณต่างๆ ที่ผ่านมานี้จะสังเกตว่าส่วนใหญ่แล้ว The Performance of Feedback Control System จะขึ้นอยู่กับค่าของ Damping Ratio (ξ) และค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural Frequency: ω_n)

2.1.2.3 Steady State Error

Steady-State Error เป็นค่าของความผิดพลาด (error) เมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์ ($t \rightarrow \infty$) เป็นค่าของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากผลกระทบ (effect) ของ Transient Response หมดไป



ภาพประกอบ 2.7 แสดงรูปทั่วไปของ Closed-loop Feedback Control System

พิจารณาจากภาพประกอบที่ 2.7 สำหรับกรณีของ Unity Feedback Control System ($H(s)=1$) ค่าของ

steady state Error ที่เกิดขึ้นคือ
$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{R(s)}{1 + G(s)}$$

2.1.2.4 Sensitivity

Sensitivity เป็นอัตราส่วนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Transfer Function เทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นของระบบที่เราพิจารณา สัญลักษณ์ ที่นิยมใช้สำหรับ Sensitivity

$$R(s) \quad + \quad E(s)$$

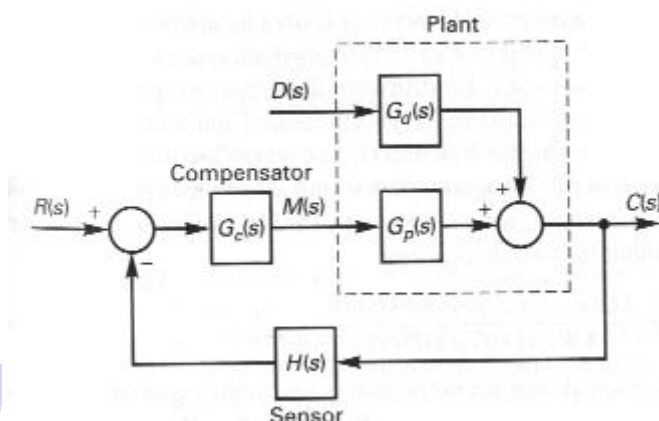
คือ S_b^T เมื่อตัวแปร b คือตัวแปรที่พิจารณาว่าถ้าตัวแปร b มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว Transfer Function มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

จากความหมายของ Sensitivity: $S_b^T = \frac{\Delta T / T}{\Delta b / b}$ หรือสำหรับที่กรณี Δ มีค่าน้อยมากๆ

สามารถเขียน Sensitivity ของระบบในรูปแบบ $S_b^T = \frac{\Delta T / T}{\Delta b / b} = \frac{\partial T / T}{\partial b / b} = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln b} = \frac{\partial T}{\partial b} \frac{b}{T}$

2.1.2.5 Disturbance Rejection

Disturbance Signal เป็นสัญญาณรบกวนระบบซึ่งเป็นเรื่องที่เราไม่ต้องการ ในการออกแบบระบบ เราต้องทำให้สัญญาณรบกวนมีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด สำหรับระบบ Feedback Control System ที่เราพิจารณาสัญญาณรบกวนด้วยจะมี Block Diagram โดยทั่วไปคือ



ภาพประกอบ 2.8 แสดง Feedback Control System ที่รวมสัญญาณรบกวน (Disturbance: $D(s)$)

พิจารณาจากภาพประกอบที่ 2.8 เราสามารถเขียนสมการของสัญญาณ Output ได้คือ

$$Y(s) = \frac{GcGp}{1 + GcGpH} R(s) + \frac{Gd}{1 + GcGpH} D(s) \quad (2.1)$$

$$Y(s) = T(s)R(s) + Td(s)D(s) \quad (2.2)$$

โดย

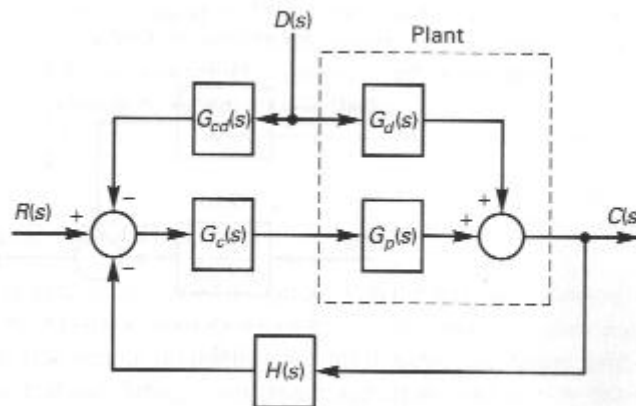
$$T(s) = \frac{GcGp}{1 + GcGpH}$$

และ

$$Td(s) = \frac{Gd}{1 + GcGpH}$$

พิจารณาจากสมการที่ (2.1) ในการที่จะลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบเราสามารถกระทำได้โดย

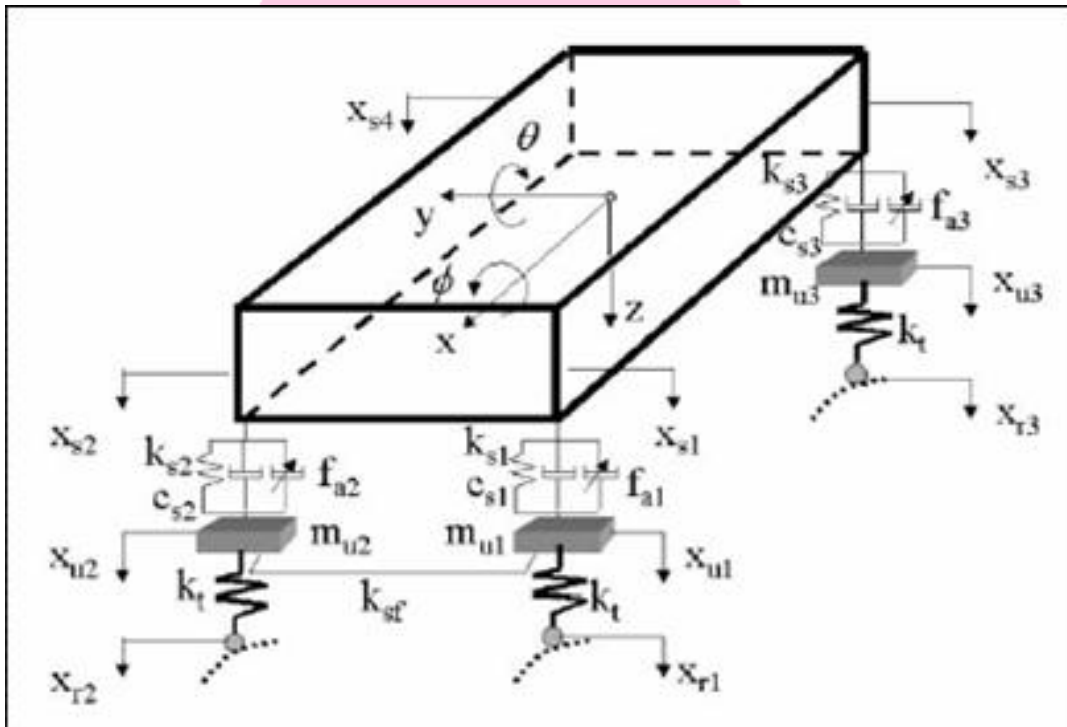
1. พยายามทำให้ $Td(s) = \frac{Gd}{1 + GcGpH}$ มีขนาดที่เล็กลงโดยการลดขนาดของ Gd
2. เพิ่มขนาดของ Loop Gain $GcGpH$ ให้มีขนาดโตขึ้น ซึ่งวิธีการนี้โดยทั่วไปหมายถึงการออกแบบตัว Controller (Gc) นั้นเอง
3. ลดขนาดของสัญญาณรบกวนให้เล็กลงเท่าที่จะทำได้
4. ใช้ Feed-forward Compensation (ดูภาพประกอบที่ 2.9) ถ้าสามารถวัดค่าของสัญญาณรบกวนได้



ภาพประกอบ 2.9 แสดง Feed-Forward Compensation [$Gcd(s)$]

2.2 ทฤษฎีที่รองรับเรื่องวิจัย

2.2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองเต็มรถยนต์



ภาพประกอบ 2.10 แสดงแบบจำลองของรถยนต์

รูปแบบจำลองเต็มของรถยนต์แสดงดังรูปที่ โดยที่ระยะการยุบตัวในแนวตั้ง (Vertical Deflection) ทั้งสี่มุมของตัวรถแทนด้วยระยะ \$X_s\$ ซึ่งค่าของระยะ \$X_s\$ จะมีความสัมพันธ์กับ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของรถ (\$X_c\$) โดยที่

$$X_c = R X_s \tag{2.3}$$

$$\text{เมื่อ } R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{t_f}{2} & \frac{t_f}{2} & -\frac{t_r}{2} & \frac{t_r}{2} \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix}, \quad X_c = [z \ \phi \ \theta]^T, \tag{2.4}$$

$$X_s = [X_{s1} \quad X_{s2} \quad X_{s3} \quad X_{s4}]^T \quad (2.5)$$

โดยที่ z แทนระยะเลื่อนตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement)

ϕ แทนมุมพิทช์ (Pitch Angle)

θ แทนมุมโรล (Roll Angle)

x_{si} แทนระยะเลื่อนตัวในแนวตั้งของมุมรถอันดับที่ i ของตัวรถ

t_f, t_r แทนความกว้างของรถด้านหน้าและด้านหลัง (Front, Rear Track Width)

l_f, l_r แทนความกว้างของฐานล้อรถด้านหน้าและด้านหลัง (Front, Rear Wheel base)

สำหรับสมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองโดยใช้วิธีนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler Method) มีรูปแบบสมการเป็น

$$\begin{aligned} M_s \ddot{X}_c + RK_s R^T X_c - RK_s X_u + RC_s R^T \dot{X}_c - RC_s \dot{X}_u &= Rf_a \\ \text{และ} \quad M_u \ddot{X}_u + K_s X_u - K_s R^T X_c + K_t X_u - X_t X_r - C_s R^T \dot{X}_c + C_s \dot{X}_u &= -f_a \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad X_u &= [x_{u1} \quad x_{u2} \quad x_{u3} \quad x_{u4}]^T \\ X_r &= [x_{r1} \quad x_{r2} \quad x_{r3} \quad x_{r4}]^T \\ f_a &= [f_{a1} \quad f_{a2} \quad f_{a3} \quad f_{a4}]^T \end{aligned}$$

$$M_s = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}, \quad M_u = \begin{bmatrix} m_{u1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{u3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u4} \end{bmatrix}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{s4} \end{bmatrix}, \quad K_t = \begin{bmatrix} k_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_t \end{bmatrix}$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{s4} \end{bmatrix}$$

โดยที่ x_{ui} แทนระยะเลื่อนตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement) ของ wheel-axle ที่ i
 x_{ri} แทนระยะตำแหน่งในแนวตั้ง (Vertical Road Elevation) ของยาง (Tire) ที่ i
 f_{ai} แทนแรงที่แขน ของ actuator ที่ i
 m_s แทนมวลของตัวรถ
 I_x แทนโมเมนต์ความเฉื่อยของแกน x (Roll moment of inertia)
 I_y แทนโมเมนต์ความเฉื่อยของแกน y (Pitch moment of inertia)
 m_{ui} แทนมวลของ wheel-axle ที่ i
 k_{si} แทนค่าคงที่สปริงของระบบรองรับ (Suspension stiffness)
 C_{si} แทนค่าแดมป์ของระบบรองรับ (Suspension damping)
 k_t แทนค่าคงที่สปริงของยาง (Tire stiffness)

ทั้งนี้จากสมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถเขียนในรูปสมการสถานะ ได้เป็น

$$\dot{X} = AX + Bf_a + LX_r \quad (2.7)$$

โดยที่ $X = [X_c^T \quad \dot{X}_c^T \quad X_u^T \quad \dot{X}_u^T]^T$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ (-M_s^{-1}RK_sR^T) & (-M_s^{-1}RC_sR^T) & (M_s^{-1}RK_s) & (M_s^{-1}RC_s) \\ 0 & 0 & 0 & I \\ (M_u^{-1}K_sR^T) & (M_u^{-1}C_sR^T) & (-M_u^{-1}K_s) & (-M_u^{-1}C_s) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1}R \\ 0 \\ M_u^{-1} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ M_u^{-1}K_t \end{bmatrix}$$

2.2.2 เทคนิคควบคุมแบบ LQG

เทคนิคควบคุมแบบ LQG เป็นรูปแบบหนึ่งสำหรับทฤษฎีการควบคุมแบบออปติมัล ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเลือกรูปแบบของปรีนซิเปิลเกนและรีเทิน เรโซ ของระบบสำหรับควบคุมตัวแปร อินพุท หรือเอาต์พุทของระบบ เพื่อให้ระบบบรรลุคุณสมบัติตามที่ปรารถนา ทั้งนี้ระบบที่ถูก ออกแบบด้วยเทคนิคควบคุมแบบ LQG จะรับประกันการมีเสถียรภาพของระบบโดยอัตโนมัติ โดย ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง เฟส แครคเตอร์สติก โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังรายละเอียด

พิจารณาระบบที่มีสมการสถานะเป็น

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma w \quad (2.8)$$

$$y = Cx + v \quad (2.9)$$

โดยที่ w, v มีคุณสมบัติเป็นไวท์นอยส์ (White noise) และมีโคเวเรียนซ์ (Covariances)

$$E\{ww^T\} = W \geq 0, \quad E\{vv^T\} = V \geq 0 \quad (2.10)$$

สำหรับกรณีที่ w, v ไม่มีความสัมพันธ์กัน (Uncorrelated)

$$E\{wv^T\} = 0 \quad (2.11)$$

พิจารณาจากสมการที่(2.8) ,(2.9) u แทนเวกเตอร์ของสัญญาณควบคุมและ y แทนเวกเตอร์ของ สัญญาณเอาต์พุท ในการออกแบบจะทำการมินิไมซ์(minimizes) เทอม

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \int_0^T (z^T Q z + u^T R u) dt \right\} \quad (2.12)$$

โดยที่ $z = Mx \quad (2.13)$

ซึ่งได้จากการรวมกันเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ

และ $Q = Q^T \geq 0, \quad R = R^T > 0 \quad (2.14)$

แทนเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (weighting matrices)

ในการแก้ปัญหาเพื่อการคำตอบของการใช้เทคนิค LQG ในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการ ประมาณค่าตัวแปรสถานะ โดยที่ตัวแปรสถานะที่ประมาณค่าเป็นไปตามเงื่อนไข $E\{(x - \hat{x})^T (x - \hat{x})\}$ มีค่าน้อยที่สุด ต่อจากนั้นก็ใช้ตัวแปรสถานะที่ประมาณค่าได้ เป็นตัวแปร สถานะจริงเพื่อทำการแก้ปัญหา ทั้งนี้ในขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรสถานะจะใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ในการประมาณค่า ในส่วนของขั้นตอนที่สองจะหาสัญญาณควบคุม u เพื่อที่จะมินิไมซ์เทอม

$$\int_0^T (z^T Q z + u^T R u) dt \quad (2.15)$$

ภายใต้สมมุติฐาน $\dot{x} = Ax + Bu$ (2.16)

ทั้งนี้คำตอบของสัญญาณควบคุมจะอยู่ในรูปแบบ

$$u = -K_c x \quad (2.17)$$

โดยที่ K_c แทน Optimal state-feedback matrix ซึ่งหาได้จากความสัมพัทธ์

$$K_c = R^{-1} B^T P_c \quad (2.18)$$

โดยที่ P_c หาได้จากการแก้สมการรีคาติ (Algebraic Riccati equation)

$$A^T P_c + P_c A - P_c B R^{-1} B^T P_c + M^T Q M = 0 \quad (2.19)$$

2.2.3 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

ในปี 1960 R.E. Kalman ได้เสนอกระบวนการประมาณสภาวะระบบแบบใหม่ โดยตีพิมพ์ในบทความเรื่อง “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problem” ซึ่งต่อมารู้จักกันดีในชื่อ Kalman Filter (ตัวกรองคาลมาน)

ตัวกรองคาลมาน คือ กระบวนการประมาณค่าของสภาวะระบบหรือข้อมูลที่มีประสิทธิภาพอย่างหนึ่ง ซึ่งมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้

กำหนดให้ระบบเชิงเส้นตรง (Linear System) มีสมการสภาวะ (Stochastic Difference Equation) ของระบบเป็น

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + Gw_k \quad (2.20)$$

และ ตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้มีสมการเป็น

$$Y_k = CX_k + v_k \quad (2.21)$$

โดย X_k คือ สภาวะของระบบ, u_k คือ สัญญาณควบคุม, Y_k คือ ข้อมูลที่สามารถวัดได้; A , B , G และ C เป็น Constant Matrices ที่มีขนาดสอดคล้องกับเวกเตอร์ X_k , u_k และ Y_k ; w_k และ v_k เป็นตัวแปรแบบสุ่ม (Random Variables) เรียกว่า Process Noise และ Measurement Noise

ตามลำดับ สมมติให้ w_k และ v_k เป็น white noises ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Uncorrelated)

Noise Covariance Matrices นิยามโดย

$$Q = E\{w_k w_k^T\} \quad (2.22)$$

$$R = E\{v_k v_k^T\} \quad (2.23)$$

โดย $E\{\cdot\}$ แทน Expectation ของตัวแปรในเครื่องหมาย $\{\cdot\}$, Q และ R เรียกว่า Process Noise Covariance Matrix และ Measurement Noise Covariance Matrix ตามลำดับ

ค่าความผิดพลาด (Error) ของการประมาณสภาวะระบบนิยามโดย

$$e_k = X_k - \hat{X}_k \quad (2.24)$$

โดย \hat{X} คือค่าประมาณของสภาวะระบบ

X_k คือค่าจริงของสภาวะระบบ

Error Covariance Matrix นิยามโดย

$$P_k = E\{e_k e_k^T\} \quad (2.25)$$

ค่า Error Covariance Matrix ณ. เวลาที่ $k+1$ ก่อนมีข้อมูลการวัด มีค่า

$$P_{k+1}^- = A P_k A^T + G Q G^T \quad (2.26)$$

และค่าประมาณของสภาวะระบบก่อนมีข้อมูลการวัด มีค่า

$$\hat{X}_{k+1}^- = A \hat{X}_k + B u_k \quad (2.27)$$

สัญลักษณ์ - แทนปริมาณที่ประมาณ ก่อน มีข้อมูลการวัด

หลังการวัดข้อมูล P_{k+1} และ X_{k+1} มีค่าตามสมการ

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1}C)P_{k+1}^- \quad (2.28)$$

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1}^- + K_{k+1}(Y_{k+1} - C\hat{X}_{k+1}^-) \quad (2.29)$$

โดย

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- C^T (CP_{k+1}^- C^T + R)^{-1} \quad (2.30)$$

Matrix K เรียกว่า Kalman Gain และปริมาณ $(Y_{k+1} - C\hat{X}_{k+1}^-)$ เรียกว่า Residual ซึ่งแทนปริมาณแตกต่างระหว่างค่าที่ประมาณได้ก่อนการวัด และค่าที่วัดได้จริง

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบรองรับกันสะเทือน เป็นอุปกรณ์สำคัญในยานยนต์ทั่วไป ระบบรองรับกันสะเทือนจะทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถยนต์ เครื่องยนต์ ผู้โดยสาร และสิ่งของต่างๆ ที่อยู่ในตัวรถยนต์ อีกทั้งยังช่วยรองรับแรงสะเทือนจากถนน และช่วยทำให้ผู้ขับขี่รถยนต์สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของถนนเนื่องจากสิ่งรบกวน (ความขรุขระของสภาพผิวถนน ความตรงหรือโค้งชันของถนน เป็นต้น) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Wright 1982) ระบบรองรับกันสะเทือนในรถยนต์โดยทั่วไปเป็นระบบรองรับกันสะเทือนแบบไม่มีตัวควบคุม ซึ่งมีอุปกรณ์หลักที่สำคัญ คือสปริง (Spring) และโช้คอัพ (Shock Absorber) สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบไม่มีตัวควบคุมที่เราพบเห็นได้บ่อยในรถยนต์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง (Rigid Suspension) ระบบกันสะเทือนแบบปีกนกคู่ (Double Wishbone) ระบบกันสะเทือนแบบแมคเฟอร์สันสตรัท (MacPherson Strut) เป็นต้น ระบบรองรับกันสะเทือนแบบไม่มีตัวควบคุมจะถูกออกแบบให้ค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงหรือแดมเปอร์มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (ค่าคงที่ที่ถูกเลือก จะเป็นค่าเหมาะสมพอดีสำหรับปัจจัยสำคัญสามอย่าง คือ สภาพของถนน น้ำหนักบรรทุกรวม และความนุ่มนวลในการขับขี่)

จากข้อจำกัดของระบบรองรับกันสะเทือนแบบไม่มีตัวควบคุม จึงมีผู้คิดค้นพัฒนาระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมขึ้น ระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมที่ได้รับการพัฒนามีทั้งที่เป็นระบบรองรับกันสะเทือนแบบ High bandwidth systems ระบบรองรับกันสะเทือนแบบ Low bandwidth systems ระบบรองรับกันสะเทือนแบบ Preview systems (Walker 1997)

นอกจากรูปแบบของระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมแล้ว (ซึ่งบริษัทรถยนต์แต่ละค่ายต่างก็มีการวิจัยและพัฒนาแบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมของตนเอง เช่น รถยนต์เมอร์เซเดส เบนซ์ รถยนต์โตโยตา รถยนต์จากรัวร์ ฯ) รูปแบบของระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมก็ได้รับความสนใจศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลายอาทิเช่น

รัฐพงศ์ ปฏิภาณัง และ บุญสร้าง ดิเรกสถาพร (2548) ได้ศึกษาการควบคุมแบบพีชซีสำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมโดยใช้แบบจำลองเต็มของยานพาหนะ ผลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมที่ใช้ระบบควบคุมแบบพีชซี จะให้ผลโดยรวมดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพี ไอ ดี (PID Controller) และระบบรองรับกันสะเทือนแบบไม่มีตัวควบคุม ทั้งในส่วนของความนุ่มนวลในการขับขี่ซึ่งพิจารณาได้จากความเร่งของตัวรถ และในส่วนของความยืดหยุ่นและความปลอดภัยซึ่งพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของแกนล้อ การเอียงตัวและการโคลงตัวของรถ

ทวิวัชร วีระเกล้า และ ปเสฏฐา สารลักษณะ (2548) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดกับการใช้ความนุ่มนวลที่สุดในระบบพลศาสตร์ โดยการศึกษาจะกล่าวถึงการหาค่าความเหมาะสมที่สุดของระบบพลศาสตร์โดยใช้ความนุ่มนวลของระบบตลอดการทำงานแทนที่จะใช้ฟังก์ชันตัวอื่น เช่น พลังงาน เวลา หรือความเร็ว ฯ ผลจากการศึกษาพบว่าคำตอบที่ได้สำหรับค่าความเหมาะสมที่สุดของระบบพลศาสตร์ที่ใช้ความนุ่มนวลจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการหาค่าความเหมาะสมที่สุดของระบบพลศาสตร์ที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

Hyun-Chul Sohn and Others (2004) ได้ศึกษาการการใช้ระบบควบคุม Road-adaptive LQG กับระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมชนิด semi-active Macpherson strut suspension ผลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมที่ใช้ระบบควบคุมแบบ Road-adaptive LQG ให้ผลโดยรวมดีกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้การควบคุมแบบ Road-adaptive LQG

Hyo-Jun Kim, Hyun Seok Yang, Young-Pil Park (2002) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุมโดยใช้ Road-sensing Algorithm โดยการศึกษาค้นคว้าได้ทำการพัฒนาสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพของถนน(Road-sensing System)เพื่อประยุกต์ใช้เก็บข้อมูลของสภาพถนนสำหรับเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบมีตัวควบคุม

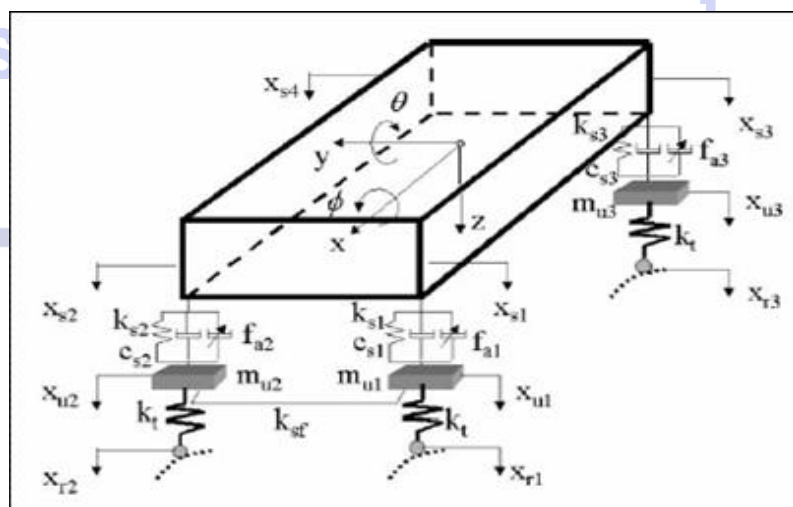
บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยเรื่องการควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาวิธีการในการลดการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับ โดยใช้ ตัวควบคุมแบบ LQG ในการควบคุมเพื่อคำนวณแรงที่ใช้ในการลดการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ การวิจัยจะอาศัยการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะในการขับขี่โดยพิจารณาจากการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถ ในการวิจัยครั้งนี้มีระเบียบวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ เป็นการวิจัยในรูปแบบการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทำการจำลองสภาพการขับขี่รถยนต์ภายใต้สภาวะที่พิกัดถนนมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อศึกษาถึงสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ โดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1



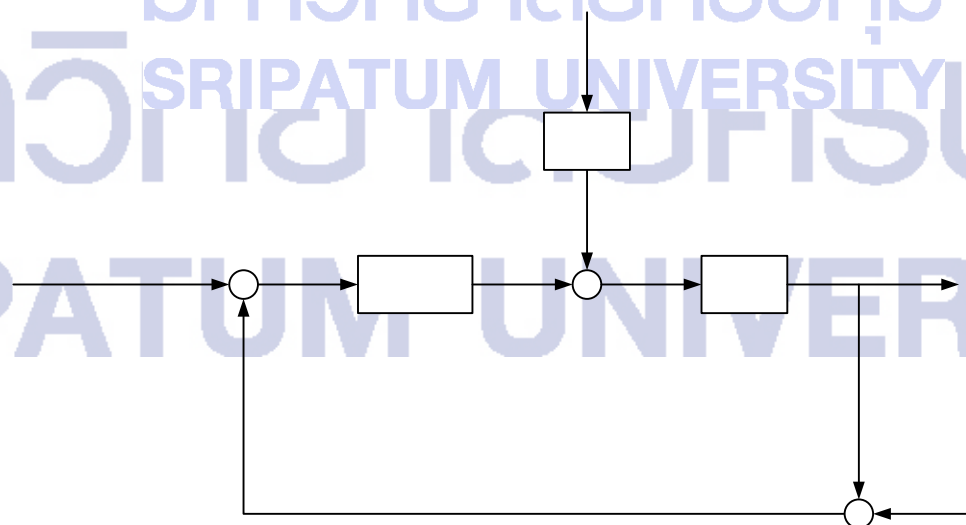
ภาพประกอบ 3.1 แบบจำลองเต็มของรถยนต์

จากภาพประกอบ 3.1 ตัวแปรที่เราสนใจคือ ระยะเลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Vertical Displacement: z) มุมพิทช์ (Pitch Angle: ϕ) มุมโรล (Roll Angle: θ)

เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ค่าของระยะเลื่อนตัวในแนวดิ่ง มุมพิทช์ และมุมโรล ของตัวรถก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะเดิม ระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับจะมี แอคทูเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งทำการปรับค่าของแรง (Force: f_a) เพื่อทำการปรับค่าของระยะเลื่อนตัวในแนวดิ่ง มุมพิทช์ และมุมโรล ของตัวรถให้คืนสู่สภาวะเดิม ทำให้สมรรถนะในการขับขี่ของรถยนต์ดีขึ้น งานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์โดยใช้เทคนิคควบคุมแบบ LQG ในการคำนวณสัญญาณควบคุม (แรง: f_a) เพื่อปรับระยะเลื่อนตัวในแนวดิ่ง มุมพิทช์ และมุมโรล ของการเคลื่อนที่ของตัวรถเพื่อให้การขับขี่รถยนต์มีสมรรถนะตามที่ต้องการ

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

สำหรับการวิจัยเรื่อง การควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับ โดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ จะทำการจำลองสภาพการขับขี่รถยนต์ภายใต้สภาวะที่สิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อศึกษาถึงสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ โดยที่ระบบสามารถแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายในภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ

พิจารณาจากภาพประกอบ 3.2 ซึ่งแสดงบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ สภาพของความขรุขระ หรือเนินของพื้นผิวถนน จะแทนด้วยสัญญาณรบกวน(disturbance signal) เมื่อรถยนต์ทำการขับเคลื่อนผ่านถนนที่มีความขรุขระก็จะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นตามลักษณะของผิวถนน หรือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบนั่นเอง รถยนต์ที่ดีการสั่นสะเทือนต้องน้อยเพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกสบายในการนั่งโดยสาร สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะเลือกใช้สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Signal) และ สัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Signal) และในส่วนของตัวควบคุมที่ใช้จะเป็น LQG Controller

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเรื่องการควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ตามรายละเอียดที่ปรากฏในบทที่ 2)
2. เลือกรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและตัวควบคุม (แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 และ 3.8)
3. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ SIMULINK
4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. สรุปผลและนำเสนองานวิจัย

3.4 เครื่องมือการวิจัย

การวิจัยเรื่องการควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ มีอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัยประกอบด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.1 พร้อม Control System Toolbox
3. โปรแกรม SIMULINK

3.5 การรวบรวมข้อมูล

สำหรับการวิจัยเรื่องการควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับ โดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะทำการจำลองการทำงานของระบบเพื่อเก็บข้อมูลใน 4 กรณีหลัก ดังนี้

1. คุณลักษณะหรือสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ เมื่อรถยนต์ขับเคลื่อนผ่านเนินแบบทันทีทันใดโดยที่ระบบไม่มีตัวควบคุม
2. คุณลักษณะหรือสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ เมื่อรถยนต์ขับเคลื่อนผ่านเนินแบบทันทีทันใดโดยที่ระบบมีตัวควบคุมแบบ LQG
3. คุณลักษณะหรือสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ เมื่อรถยนต์ขับเคลื่อนผ่านเนิน โดยมีสัญญาณเตือนล่วงหน้า โดยที่ระบบไม่มีตัวควบคุมแบบ LQG
4. คุณลักษณะหรือสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ เมื่อรถยนต์ขับเคลื่อนผ่านเนิน โดยมีสัญญาณเตือนล่วงหน้า โดยที่ระบบมีตัวควบคุมแบบ LQG

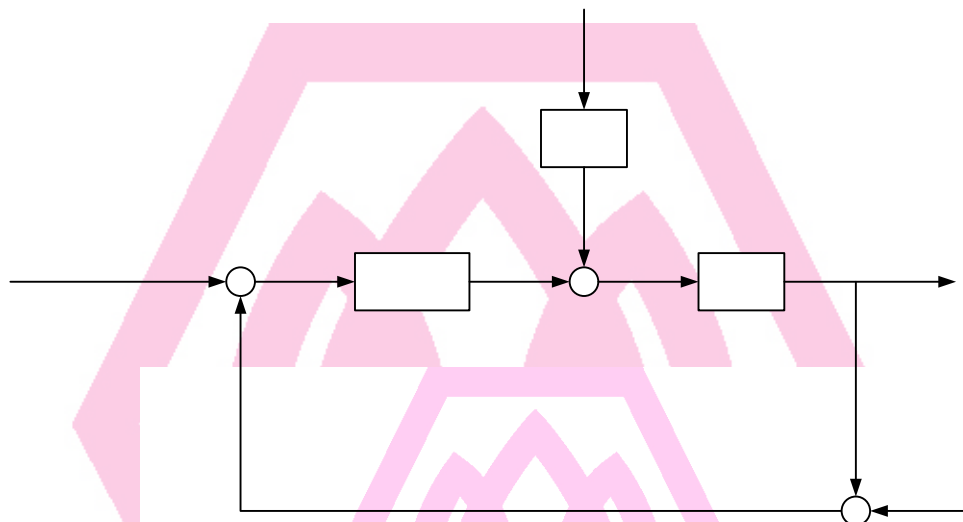
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะถูกนำมาพิจารณา และวิเคราะห์ถึงผล ของระยะเลื้อนตัวในแนวดิ่ง มุมพิตช์ และมุมโรล ความเร็วในแนวแกนทั้งสาม รวมทั้งค่าของสัญญาณควบคุม(แรง) โดยจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ย(mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ค่า Root Mean Square (RMS) , และค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Max-Min) เพื่อทำการเปรียบเทียบผลในแต่ละกรณี

3.7 การสรุปผลและนำเสนองานวิจัย

สรุปผลและนำเสนองานวิจัยโดยความเรียง ประกอบตารางและกราฟข้อมูล

3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและตัวควบคุม



ภาพประกอบ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ (ซ้ำ)

พิจารณาจากภาพประกอบ 3.2 ในส่วนของรถยนต์ (Plant ในภาพประกอบ3.2) ถูกกำหนดด้วยสมการต่อเนื่อง

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_c \cdot X + B_c \cdot U + G_c \cdot Xr \\ Y &= C_c \cdot X + V \end{aligned} \tag{3.1}$$

โดยที่

X = State Variables **Input Signal = 0** -

U = Control Signal

Xr = Disturbance Signals, Road Profiles

Y = Plant Output (Vertical, Pitch, Roll Position)

**LQG
Controller**

และค่าคงที่มีค่าเป็น

Ac =

Columns 1 through 7

0	0	0	1.0000	0	0	0
0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0	1.0000	0
-50.0692	0	-9.2080	-2.8487	0	-1.0261	10.8309
0	-63.6664	0	0	-3.6260	0	-18.4284
-3.9783	0	-40.3062	-0.4433	0	-2.2932	-6.3875
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
52.1429	-38.6118	-71.1750	2.5238	-1.8689	-3.4450	-52.1429
52.1429	38.6118	-71.1750	2.5238	1.8689	-3.4450	0
68.3810	-51.0464	93.3400	4.3333	-3.2348	5.9150	0
68.3810	51.0464	93.3400	4.3333	3.2348	5.9150	0

Columns 8 through 14

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10.8309	14.2038	14.2038	0.5242	0.5242	0.9001	0.9001
18.4284	-24.3630	24.3630	-0.8920	0.8920	-1.5439	1.5439
-6.3875	8.3767	8.3767	-0.3092	-0.3092	0.5308	0.5308
0	0	0	1.0000	0	0	0
0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	0	0	1.0000
0	0	0	-2.5238	0	0	0
-52.1429	0	0	0	-2.5238	0	0
0	-68.3810	0	0	0	-4.3333	0
0	0	-68.3810	0	0	0	-4.3333

Bc =

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
-0.0017	0.0017	-0.0017	0.0017
-0.0006	-0.0006	0.0006	0.0006
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0.0048	0	0	0
0	0.0048	0	0
0	0	0.0048	0

```

Cc =

    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    904.7619    0    0    0
    0    904.7619    0    0
    0    0    904.7619    0
    0    0    0    904.7619

```

```

Cc =

Columns 1 through 12

    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0

Columns 13 through 14

    0    0
    0    0
    0    0

```

ทำการแปลงสมการต่อเนื่องในสมการที่ 3.1 เป็นสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete plant model) โดยใช้สมการ

$$X(k+1) = [I + A_c T] \cdot X(k) + [IT + \frac{A_c T^2}{2}] \cdot B_c \cdot U(k) + [IT + \frac{A_c T^2}{2}] \cdot G_c \cdot Xr(k) \quad (3.2)$$

$$Y(k) = C_c(k) \cdot X(k) + V(k)$$

โดยการเลือกใช้เวลาสุ่ม 0.001 วินาทีเราได้

$$X(k+1) = A_d \cdot X(k) + B_d \cdot U(k) + G_d \cdot Xr(k)$$

$$Y(k) = C_d(k) \cdot X(k) + V(k)$$

เมื่อ

Ad =						
Columns 1 through 7						
1.0000	0	0	0.0010	0	0	0
0	1.0000	0	0	0.0010	0	0
0	0	1.0000	0	0	0.0010	0
-0.0501	0	-0.0092	0.9972	0	-0.0010	0.0108
0	-0.0637	0	0	0.9964	0	-0.0184
-0.0040	0	-0.0403	-0.0004	0	0.9977	-0.0064
0	0	0	0	0	0	1.0000
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0521	-0.0386	-0.0712	0.0025	-0.0019	-0.0034	-0.0521
0.0521	0.0386	-0.0712	0.0025	0.0019	-0.0034	0
0.0684	-0.0510	0.0933	0.0043	-0.0032	0.0059	0
0.0684	0.0510	0.0933	0.0043	0.0032	0.0059	0
Columns 8 through 14						
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0108	0.0142	0.0142	0.0005	0.0005	0.0009	0.0009
0.0184	-0.0244	0.0244	-0.0009	0.0009	-0.0015	0.0015
-0.0064	0.0084	0.0084	-0.0003	-0.0003	0.0005	0.0005
0	0	0	0.0010	0	0	0
1.0000	0	0	0	0.0010	0	0
0	1.0000	0	0	0	0.0010	0
0	0	1.0000	0	0	0	0.0010
0	0	0	0.9975	0	0	0
-0.0521	0	0	0	0.9975	0	0
0	-0.0684	0	0	0	0.9957	0
0	0	-0.0684	0	0	0	0.9957

Bd =

1.0e-005 *

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
0.0989	0.0989	0.0990	0.0990
-0.1682	0.1682	-0.1697	0.1697
-0.0584	-0.0584	0.0584	0.0584
0.0002	0	0	0
0	0.0002	0	0
0	0	0.0002	0
0	0	0	0.0002
0.4760	0.0001	0.0002	-0.0001
0.0001	0.4760	-0.0001	0.0002
0.0003	-0.0002	0.4758	0.0001
0.0002	0.0002	0.0001	0.4758

Gd =

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0.0002	0.0002	0.0004	0.0004
-0.0004	0.0004	-0.0007	0.0007
-0.0001	-0.0001	0.0002	0.0002
0.0005	0	0	0
0	0.0005	0	0
0	0	0.0005	0
0	0	0	0.0005
0.9036	0	0	0
0	0.9036	0	0
0	0	0.9028	0
0	0	0	0.9028

Cd =

Columns 1 through 12

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 13 through 14

0	0
0	0
0	0

พิจารณาในส่วนของตัวควบคุม LQG จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ

- a. Linear Quadratic Regulator Design (LQR)
- b. Optimal State Estimation Design (Kalman Filter, KF)

a. ขั้นตอนการออกแบบ LQR problem

สำหรับระบบที่กำหนดด้วยสมการ

$$X(k+1) = A \cdot X(k) + B \cdot U(k) \quad (3.3)$$

ค่าของสัญญาณควบคุมจะมีค่าเป็น

$$U(k) = K_{lqr} X(k) \quad (3.4)$$

ทำการ minimize ทอม performance index

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n (X^T(k) \cdot Q_{lqr} \cdot X(k) + U^T(k) \cdot R_{lqr} \cdot U(k)) \quad (3.5)$$

โดยที่ค่าของ the optimal state feedback gain มีค่าเป็น

$$K_{lqr} = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (3.6)$$

โดยที่ค่าของ P ได้จากการแก้สมการ The steady-state algebraic Riccati equation (ARE)

ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็น

$$0 = A^T P A - P + Q - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (3.7)$$

b. ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองคาลมาน (Kalman filter)

สำหรับระบบที่กำหนดด้วยสมการ

$$X(k+1) = A \cdot X(k) + G \cdot W(k) \quad (3.8)$$

$$Y(k) = C \cdot X(k) + V(k) \quad (3.9)$$

โดยที่

$W(k)$ เป็น disturbance process noises.

$V(k)$ เป็น measurement noises.

ทั้งนี้ $W(k)$ และ $V(k)$ เป็น white noises.

สำหรับ The noise covariance matrices มีค่าเป็น

$$Q_{kf} = E\{W(k) \cdot W^T(k)\} \quad (3.10)$$

$$R_{kf} = E\{V(k) \cdot V^T(k)\} \quad (3.11)$$

$$E\{W(k) \cdot V^T(k)\} = 0 \quad (3.12)$$

สำหรับสถานะคงตัวค่าของ the error covariance matrix จะถูกเข้าค่าคงที่

$$P \equiv P(k+1) = P(k) \quad (3.13)$$

ค่าของ the steady-state Kalman gain matrix จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$K_{kf} = P \cdot C^T (C \cdot P \cdot C^T + R_{kf})^{-1} \quad (3.14)$$

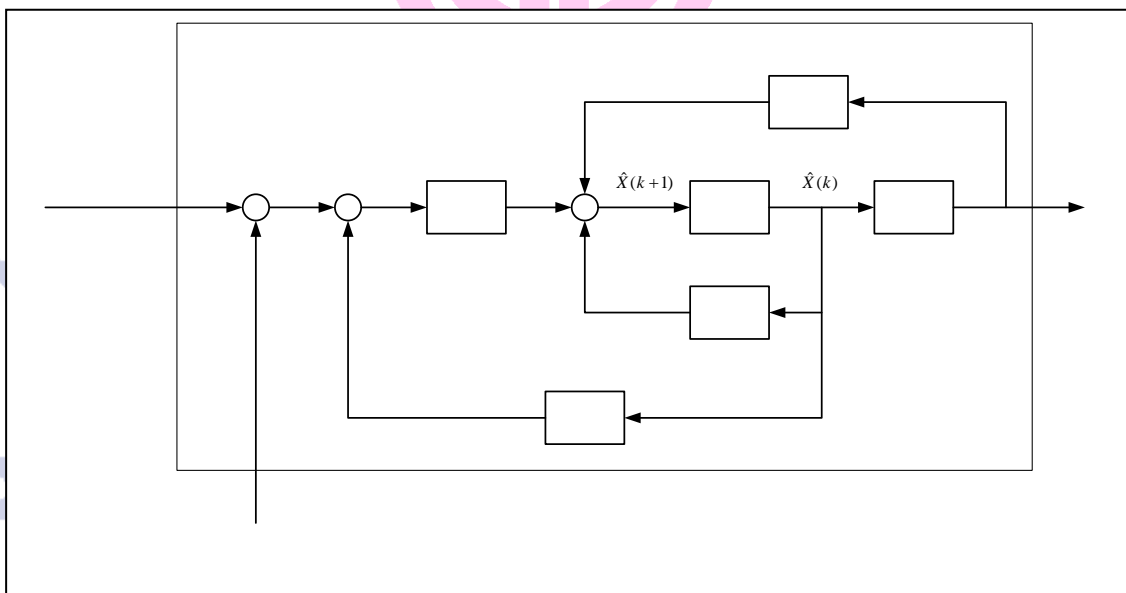
โดยที่ค่าของ P ได้จากการแก้สมการ Another steady-state algebraic Riccati equation (ARE)

$$P = A \cdot [P - P \cdot C^T (C \cdot P \cdot C^T + R_{kf})^{-1} C \cdot P] A^T + G \cdot Q_{kf} \cdot G^T \quad (3.15)$$

ดังนั้นค่าของ The estimated state มีค่าเป็น

$$\hat{X}(k+1) = A \cdot \hat{X}(k) + B \cdot U(k) + A \cdot K_{kf} (Y(k) - C \cdot \hat{X}(k)) \quad (3.16)$$

สำหรับแผนผังของ LQG controller แสดงดังภาพประกอบที่ 3.3



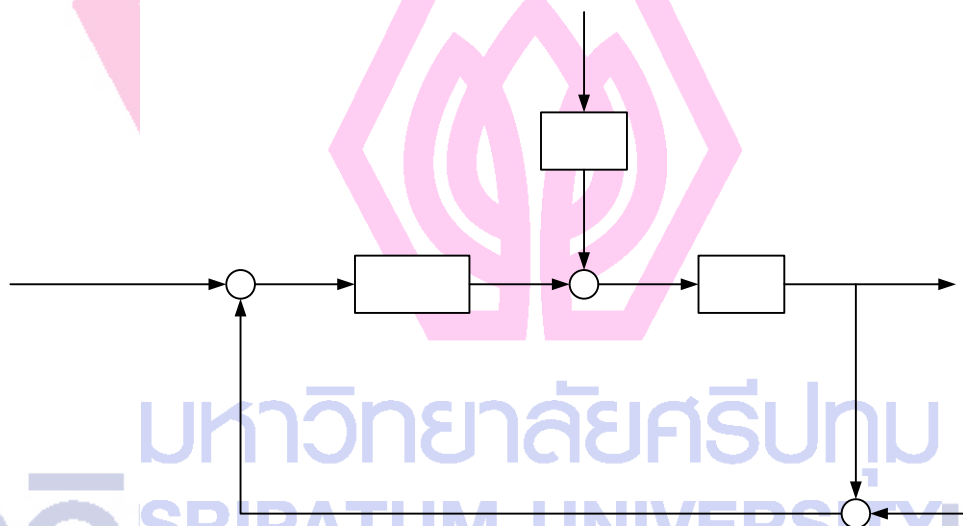
ภาพประกอบ 3.3 แสดงแผนผังของ LQG controller

บทที่ 4

ผลการจำลองการทำงานระบบด้วยคอมพิวเตอร์

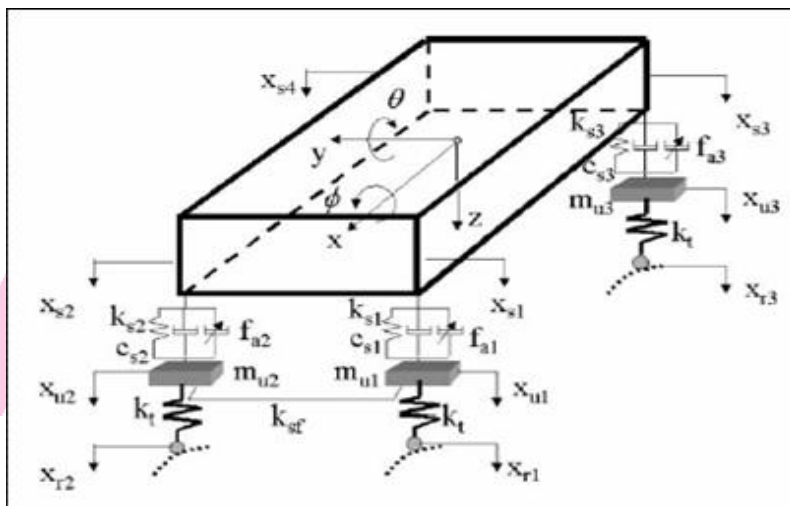
4.1 ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ในการวิจัยเรื่อง การควบคุมแบบ LQG สำหรับระบบรองรับกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ จะทำการจำลองสภาพการขับขี่ยรถยนต์ภายใต้สภาวะที่ผิวถนนมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อศึกษาถึงสภาพการสั่นสะเทือนและการโคลงตัวของรถยนต์ โดยที่ระบบสามารถแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายในภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ถูกควบคุม (Plant)

จากระบบในภาพประกอบ 4.1 สำหรับ Plant จะใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 แบบจำลองเต็มของรถยนต์

จากภาพประกอบ 4.2 แบบจำลองเต็มของรถยนต์จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อเนื่อง

$$\dot{X} = A_c \cdot X + B_c \cdot U + G_c \cdot Xr$$

$$Y = C_c \cdot X + V$$

โดยที่ค่าของตัวแปร และเมทริกซ์ค่าคงที่ต่างๆ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 (หัวข้อที่ 3.8)

4.2 กรณีศึกษาจากการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ได้แบ่งกรณีศึกษาดังรายละเอียด ดังนี้

4.2.1. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสภาวะที่ไม่มีตัวควบคุม โดยจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่เป็นหลุมหรือเนิน (รูปแบบสัญญาณเป็น Impulse Road Profile)

4.2.2. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสภาวะที่เพิ่มเติมตัวควบคุมแบบ LQG เข้าไปในระบบ และจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่เป็นหลุมหรือเนิน

4.2.3. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม โดยจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่ขรุขระสม่ำเสมอ (รูปแบบสัญญาณเป็น Sine Road Profile)

4.2.4. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่เพิ่มเติมตัวควบคุมแบบ LQG เข้าไปในระบบ และจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่ขรุขระสม่ำเสมอ

โดยทุกกรณีจะทำการจำลองระบบเพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะในการขับที่รถยนต์ซึ่งประกอบด้วย Vertical Displacement, Vertical Velocity, Pitch Angle, Pitch Velocity, Roll Angle และ Roll Velocity

4.3 รูปแบบการนำเสนอข้อมูล

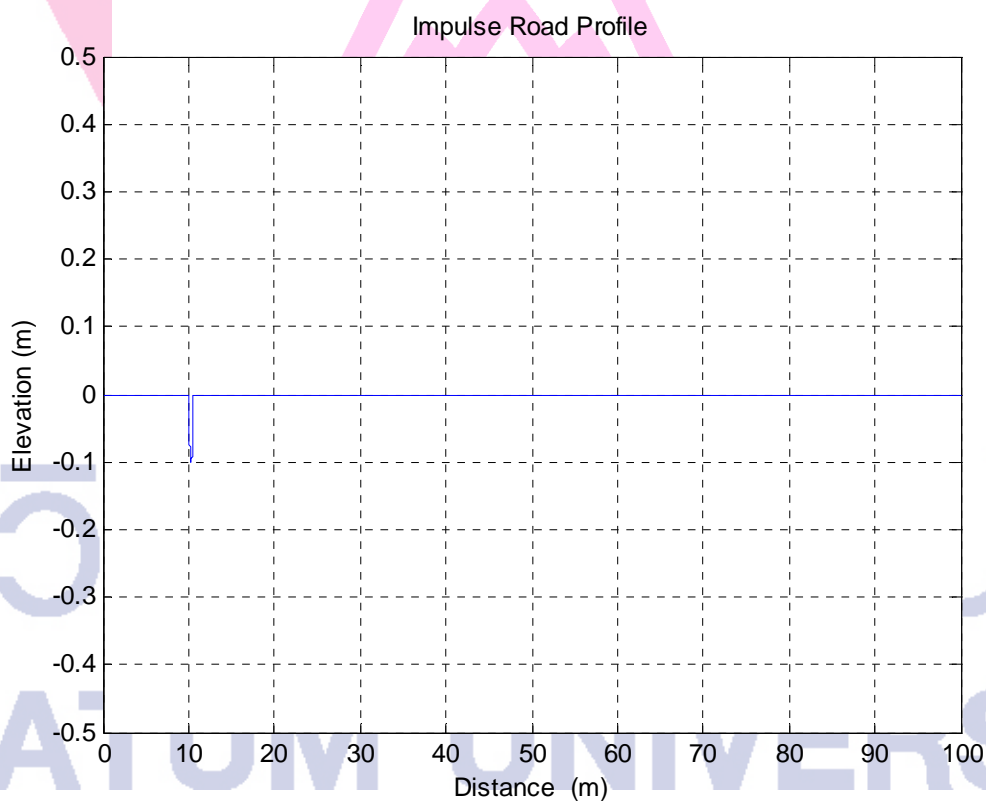
สำหรับแต่ละกรณีของการจำลองการทำงานระบบในหัวข้อที่ 4.2 จะนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟจำนวน 7 ชุดซึ่งประกอบด้วย

1. กราฟแสดงพื้นผิวจำลองของถนน(Road Profile)
2. กราฟแสดงระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวรถยนต์(Vertical Displacement) พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ค่าสูงสุด-ต่ำสุด(Maximum-Minimum) และค่า RMS (Root Mean Square)
3. กราฟแสดง Pitch Angle ของตัวรถ พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่า RMS
4. กราฟแสดง Roll Angle ของตัวรถ พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่า RMS
5. กราฟแสดงความเร็วในแนวตั้งของตัวรถยนต์(Vertical Velocity) พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่า RMS
6. กราฟแสดงความเร็ว Pitch Velocity พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่า RMS
7. กราฟแสดงความเร็ว Roll Velocity พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่า RMS

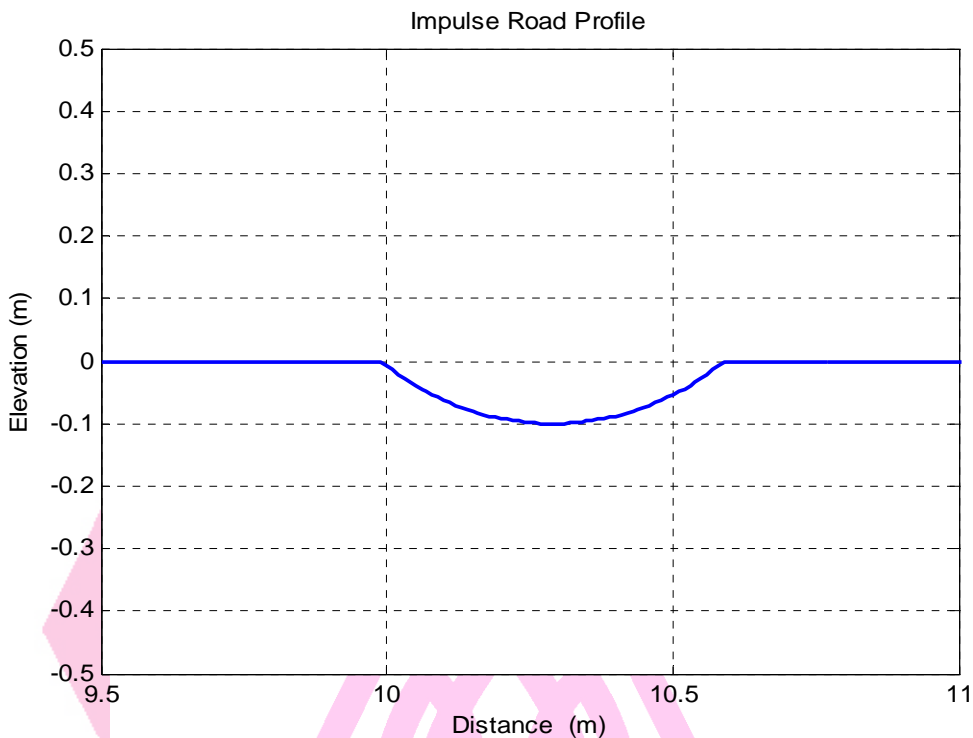
4.4 ตัวอย่างการนำเสนอข้อมูล

จากการจำลองการทำงานระบบจำนวน 4 กรณี ในแต่ละกรณีจะมีข้อมูลแสดงในรูปแบบกราฟจำนวน 7 รูป ดังนั้นจึงมีกราฟข้อมูลทั้งหมดรวม 28 รูป ในที่นี้จะนำเสนอตัวอย่างกราฟข้อมูลจากการจำลองการทำงานระบบ พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดของกราฟข้อมูล ในกรณีที่ 4.2.1 และ 4.2.2 เท่านั้น ส่วนกรณีที่เหลือได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

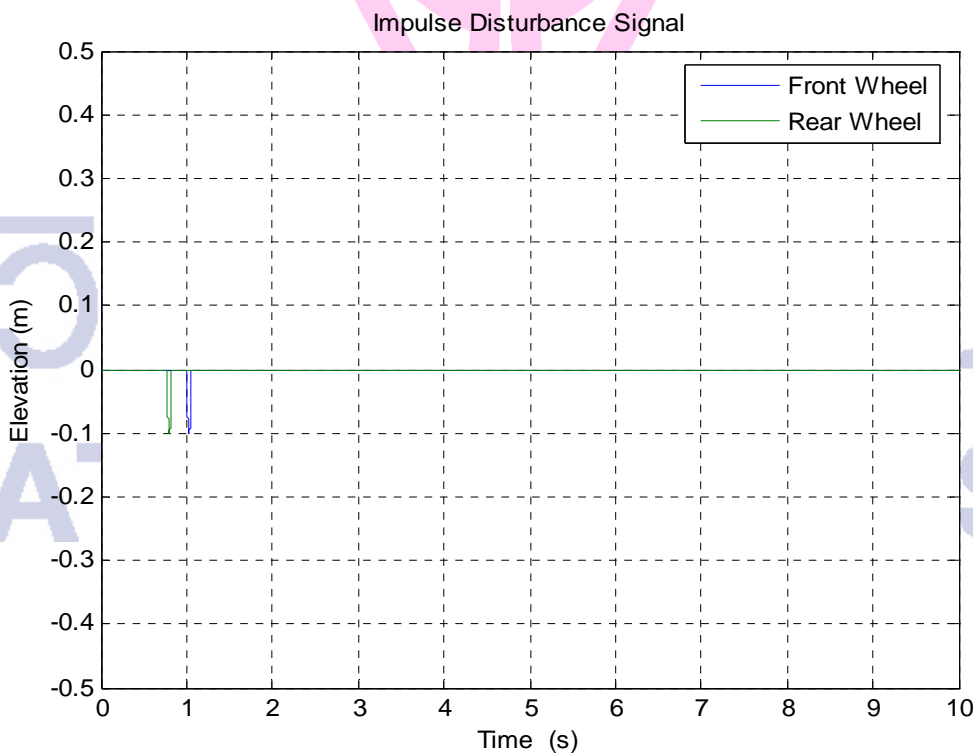
4.4.1. กราฟแสดงพื้นผิวจำลองของถนน(Road Profile) จะมีรูปแบบเป็นหลุมที่มีความลึกของหลุมขนาด 10 cm และมีความกว้างประมาณ 60 cm โดยที่ล้อรถยนต์ทั้งล้อหน้าและล้อหลังจะแล่นผ่านหลุมที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 4.3 - 4.6



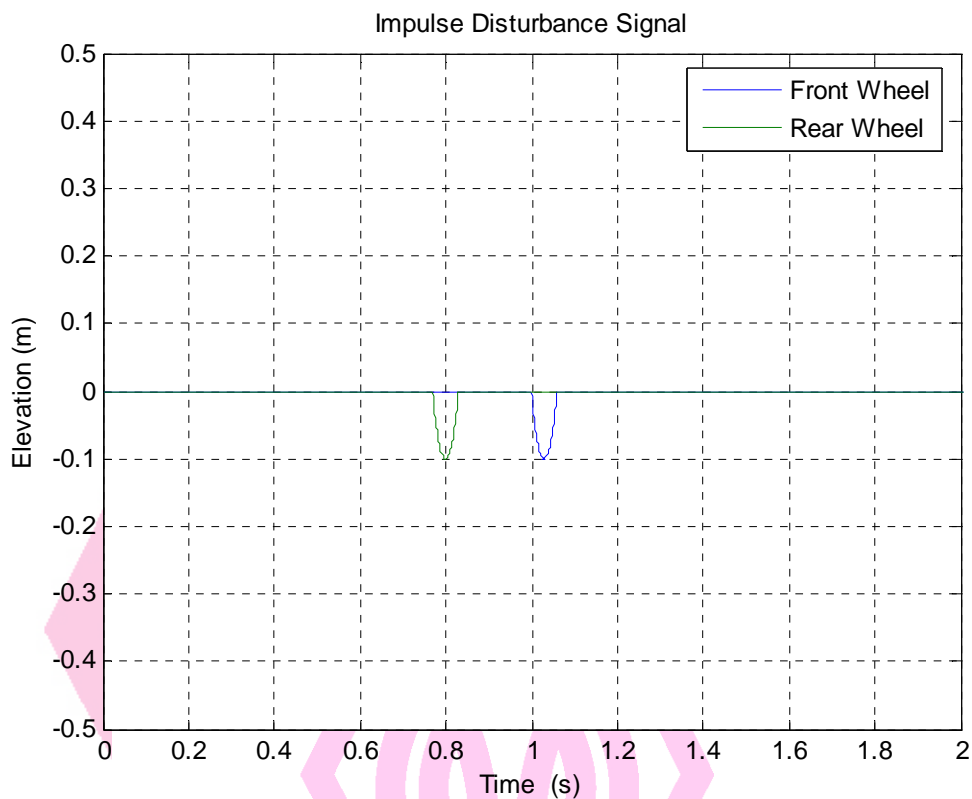
ภาพประกอบ 4.3 กราฟแสดง Impulse Road Profile



ภาพประกอบ 4.4 กราฟแสดง Impulse Road Profile (ขยาย)

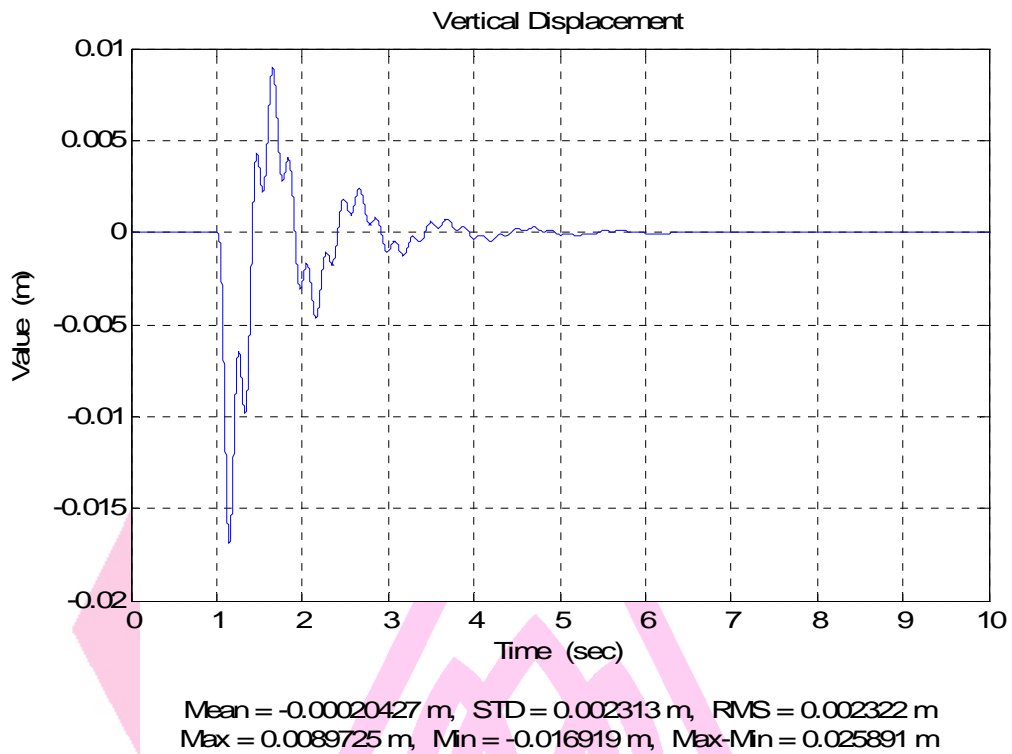


ภาพประกอบ 4.5 กราฟแสดง Impulse Disturbance Signal ของล้อหน้าและล้อหลัง

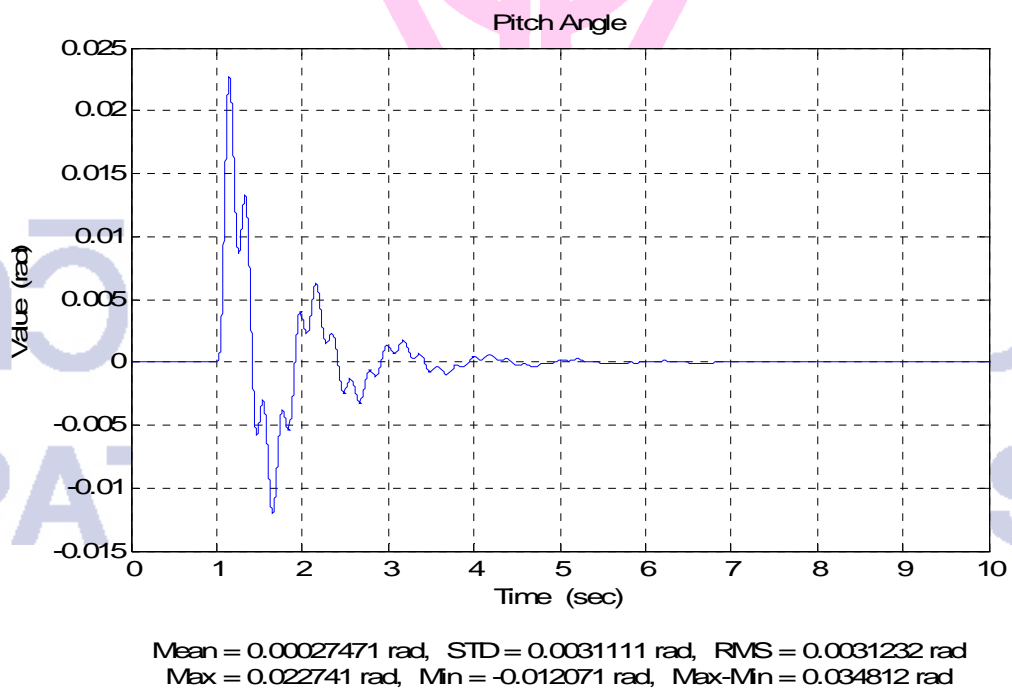


ภาพประกอบ 4.6 กราฟแสดง Impulse Disturbance Signal ของล้อหน้าและล้อหลัง(ขยาย)

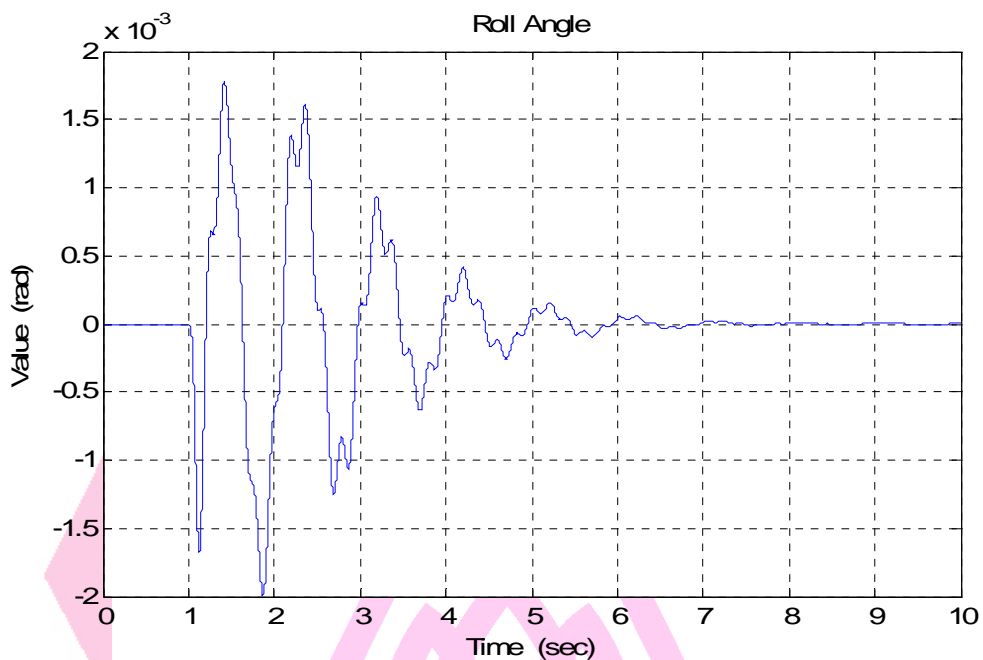
4.4.2 กราฟแสดงคุณลักษณะในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในสภาพที่ไม่มีตัวควบคุม ภายใต้ลักษณะของพิกัดที่กำหนดตามหัวข้อที่ 4.4.1 แสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 4.7 - 4.12



ภาพประกอบ 4.7 กราฟแสดง Vertical Displacement ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม

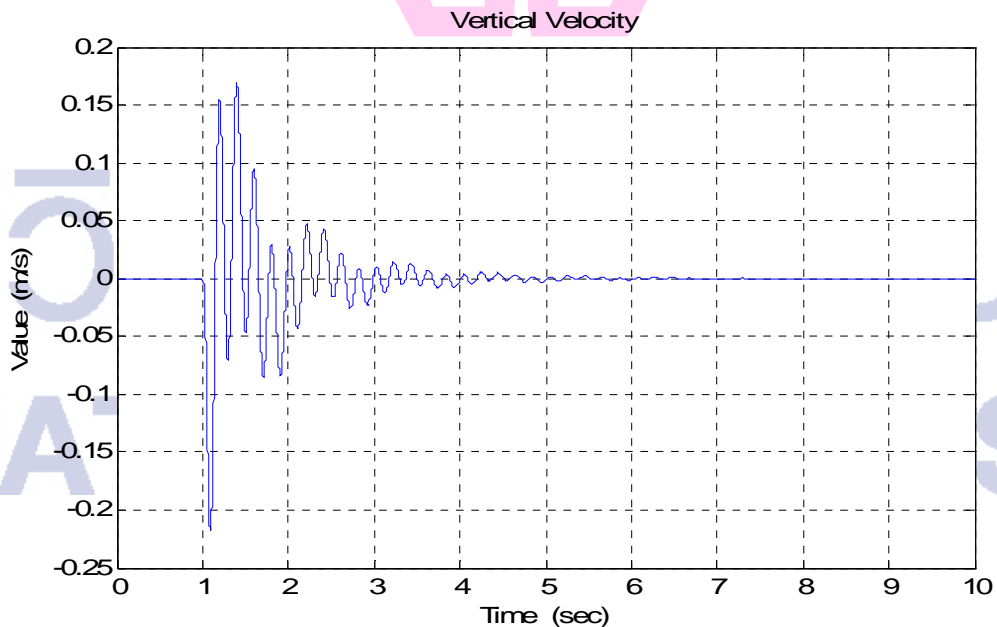


ภาพประกอบ 4.8 กราฟแสดง Pitch Angle ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม



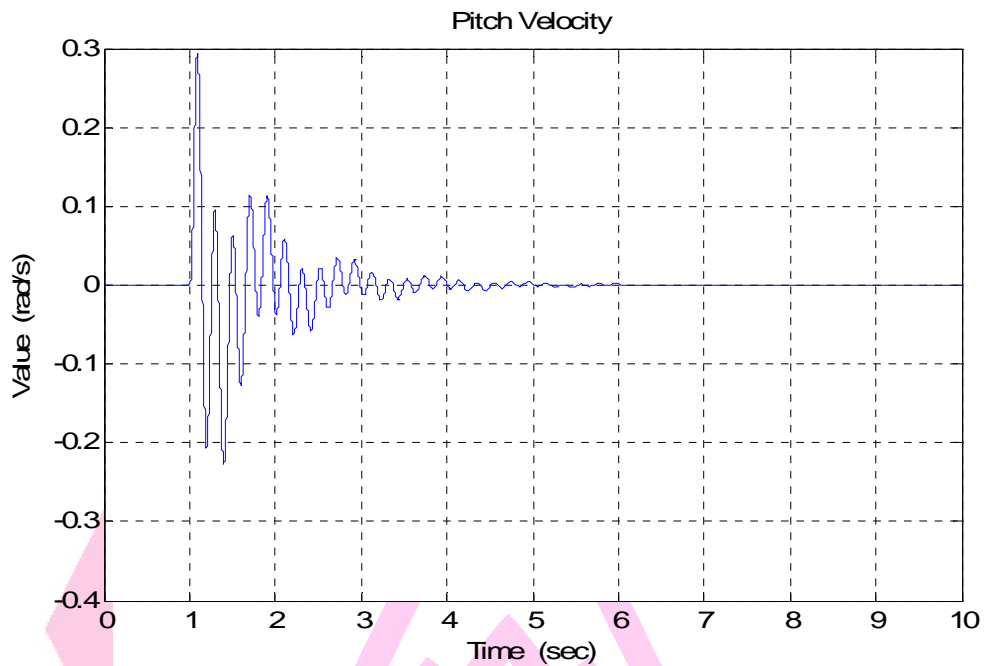
Mean = -1.8276×10^{-8} rad, STD = 0.00049827 rad, RMS = 0.00049827 rad
 Max = 0.0017822 rad, Min = -0.0019905 rad, Max-Min = 0.0037727 rad

ภาพประกอบ 4.9 กราฟแสดง Roll Angle ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม



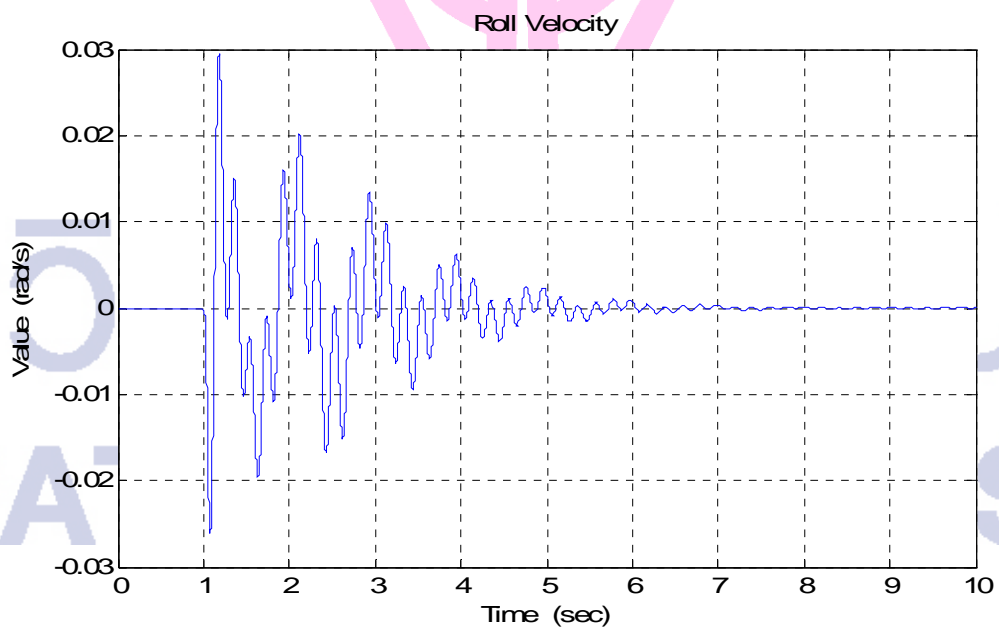
Mean = -4.9744×10^{-8} m/s, STD = 0.028566 m/s, RMS = 0.028566 m/s
 Max = 0.16902 m/s, Min = -0.21842 m/s, Max-Min = 0.38744 m/s

ภาพประกอบ 4.10 กราฟแสดง Vertical Velocity ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม



Mean = $7.7637e-008$ rad/s, STD = 0.03841 rad/s, RMS = 0.03841 rad/s
 Max = 0.29356 rad/s, Min = -0.22728 rad/s, Max-Min = 0.52084 rad/s

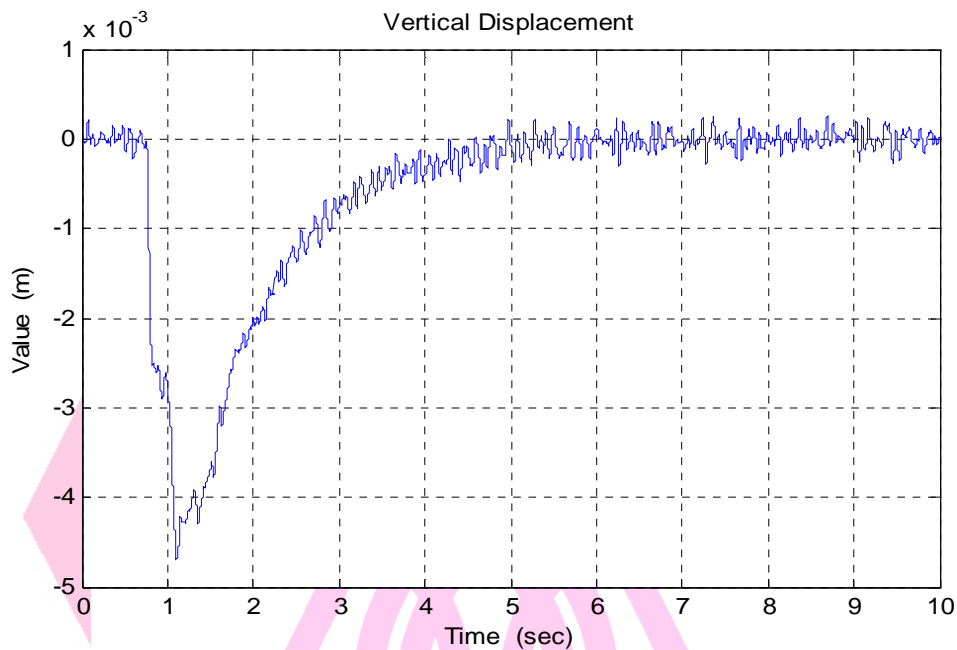
ภาพประกอบ 4.11 กราฟแสดง Pitch Velocity ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม



Mean = $3.0891e-008$ rad/s, STD = 0.0052008 rad/s, RMS = 0.0052008 rad/s
 Max = 0.029528 rad/s, Min = -0.026208 rad/s, Max-Min = 0.055735 rad/s

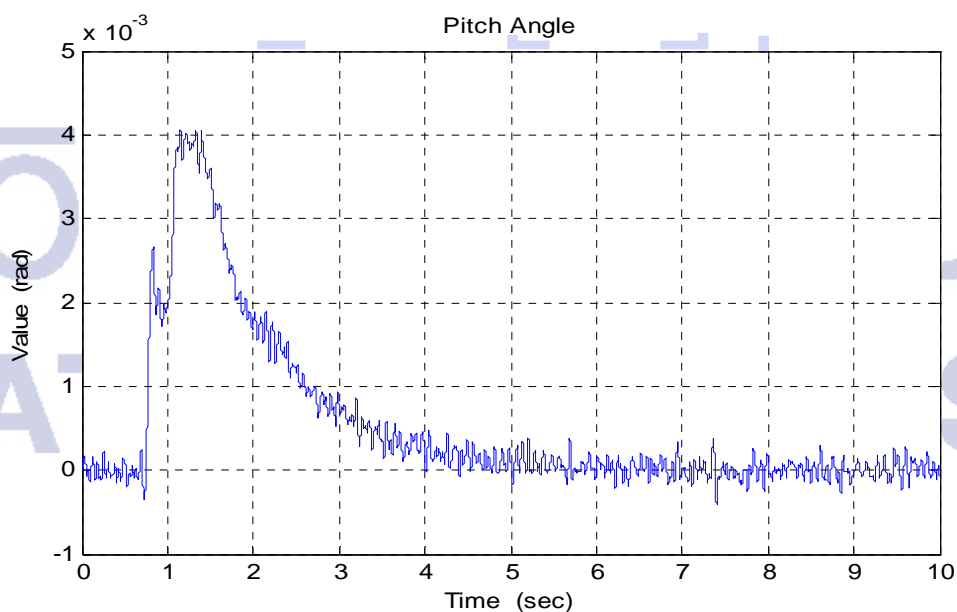
ภาพประกอบ 4.12 กราฟแสดง Roll Velocity ของรถในสภาวะที่ไร้ตัวควบคุม

4.4.3 กราฟแสดงคุณลักษณะในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในสภาพที่มีตัวควบคุม ภายใต้ลักษณะของพิกัดที่กำหนดตามหัวข้อที่ 4.4.1 แสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 4.13 - 4.18



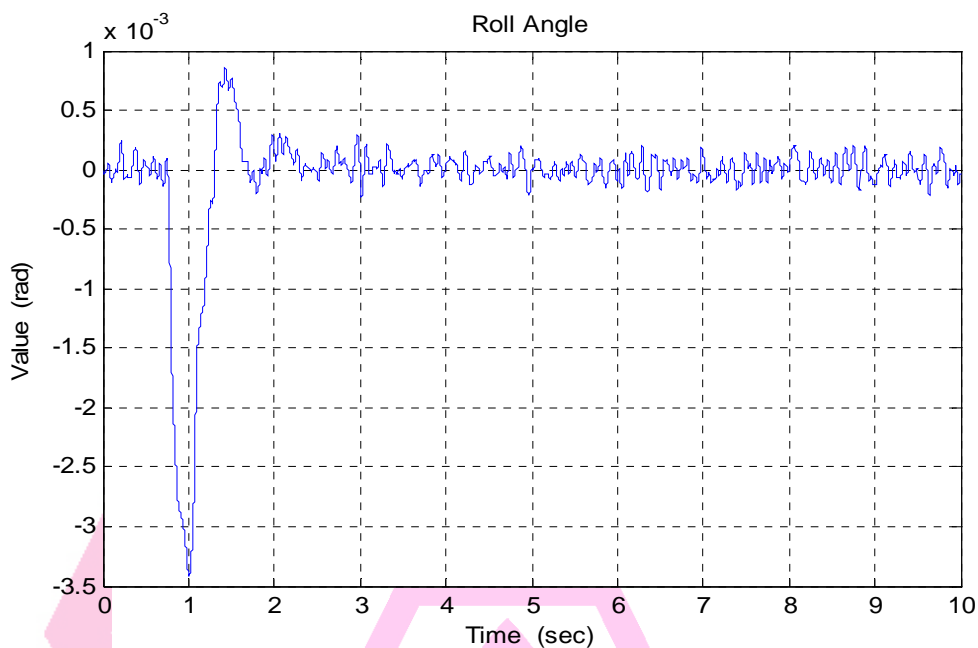
Mean = -0.00060337 m, STD = 0.0011019 m, RMS = 0.0012563 m
 Max = 0.000261 m, Min = -0.0046981 m, Max-Min = 0.0049591 m

ภาพประกอบ 4.13 กราฟแสดง Vertical Displacement ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม



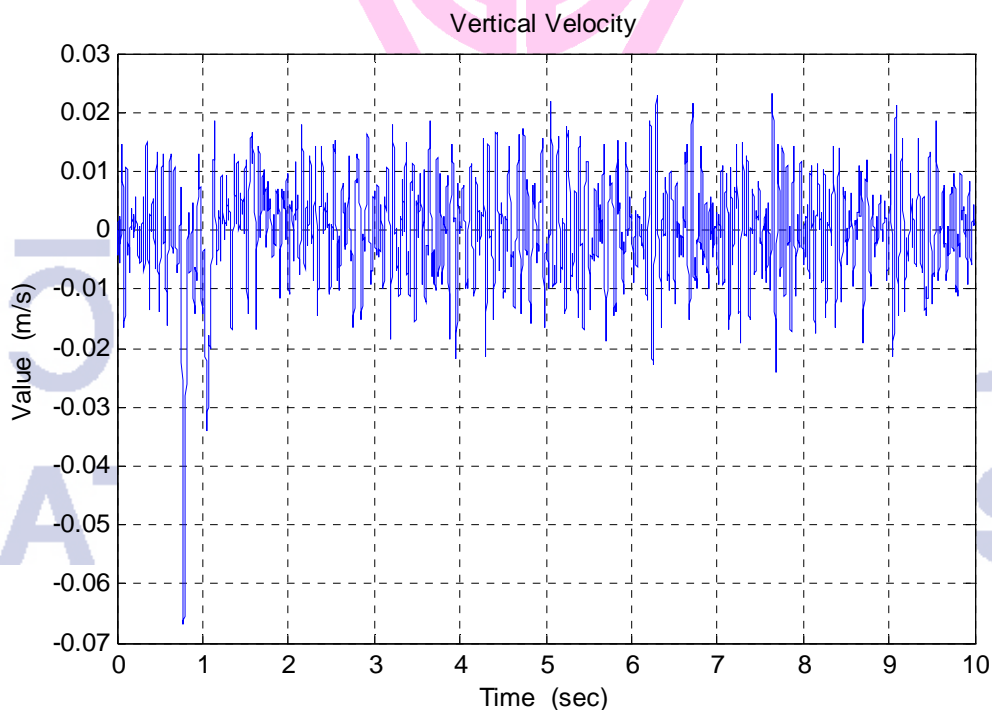
Mean = 0.0005362 rad, STD = 0.00098713 rad, RMS = 0.0011234 rad
 Max = 0.0040596 rad, Min = -0.00040441 rad, Max-Min = 0.004464 rad

ภาพประกอบ 4.14 กราฟแสดง Pitch Angle ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม



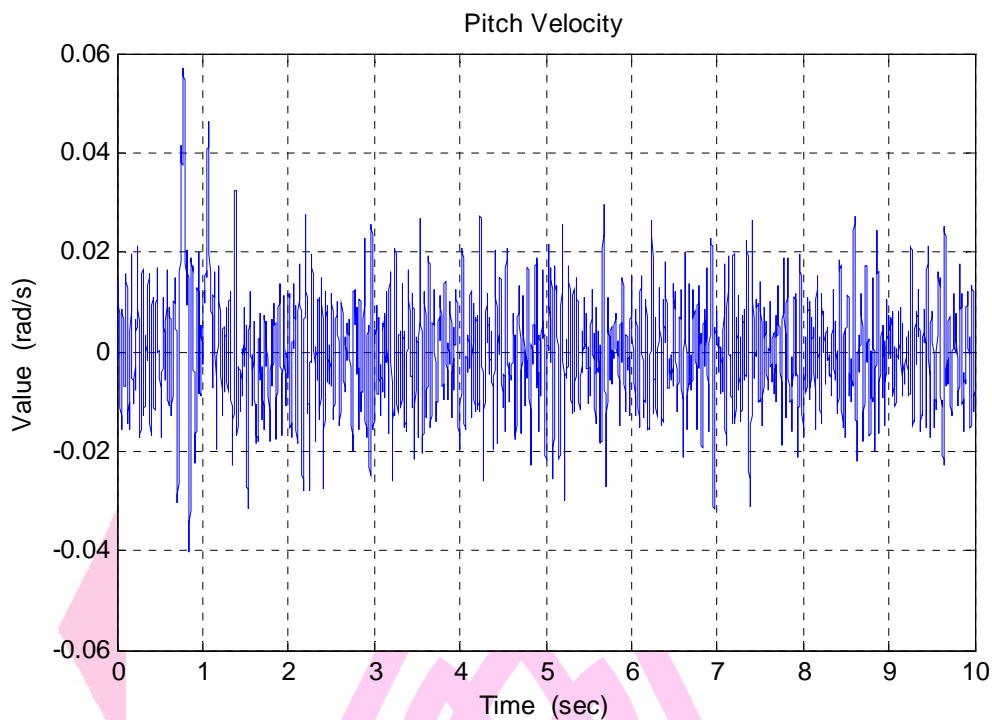
Mean = -6.8927×10^{-5} rad, STD = 0.00052242 rad, RMS = 0.00052695 rad
 Max = 0.00086168 rad, Min = -0.0034204 rad, Max-Min = 0.0042821 rad

ภาพประกอบ 4.15 กราฟแสดง Roll Angle ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม



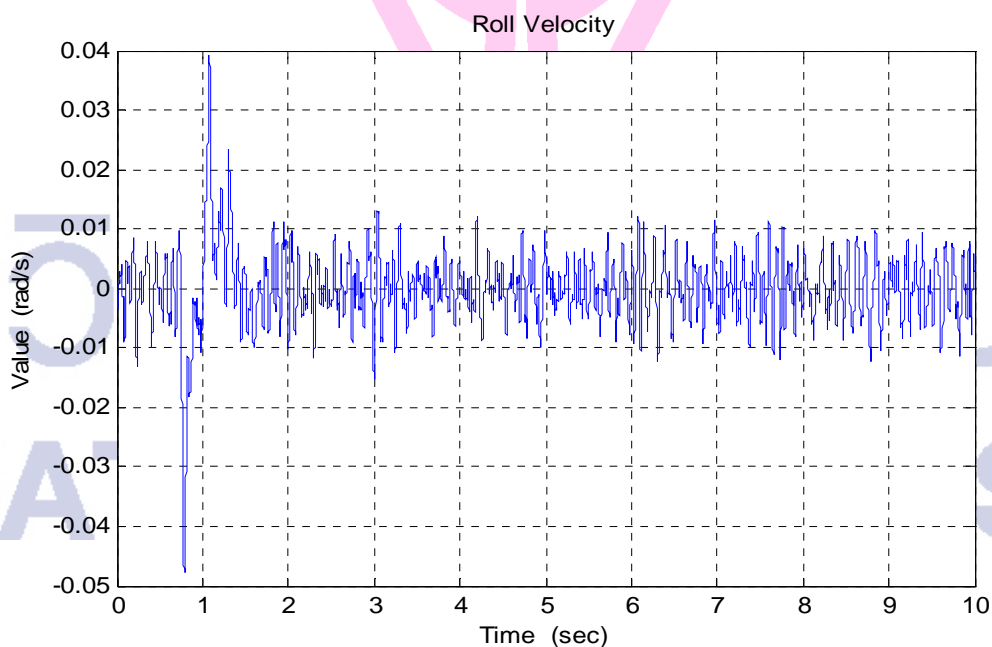
Mean = -3.7358×10^{-5} m/s, STD = 0.0085517 m/s, RMS = 0.0085518 m/s
 Max = 0.023302 m/s, Min = -0.06685 m/s, Max-Min = 0.090151 m/s

ภาพประกอบ 4.16 กราฟแสดง Vertical Velocity ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม



Mean = 5.8215×10^{-5} rad/s, STD = 0.010684 rad/s, RMS = 0.010684 rad/s
 Max = 0.057148 rad/s, Min = -0.040465 rad/s, Max-Min = 0.097612 rad/s

ภาพประกอบ 4.17 กราฟแสดง Pitch Velocity ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม



Mean = -3.5727×10^{-6} rad/s, STD = 0.0062098 rad/s, RMS = 0.0062098 rad/s
 Max = 0.039192 rad/s, Min = -0.047715 rad/s, Max-Min = 0.086907 rad/s

ภาพประกอบ 4.18 กราฟแสดง Roll Velocity ของรถในสภาวะที่มีตัวควบคุม

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานของระบบ ในกรณีต่างๆทั้ง 4 กรณี ซึ่งผลการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 นั้น จะใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG โดยอาศัยพรรณนิจี๊วัดซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-Minimum) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า Root Mean Square of Error (RMS Error)

5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับกรณีของ Impulse Road Profile

5.1.1 Vertical Position และ Vertical Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Impulse Road Profile** ค่าของพรรณนิจี๊วัดของระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 สำหรับ Vertical Position และ Vertical Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.1 ค่าพรรณนิจี๊วัดของระบบ สำหรับ Vertical Position

Vertical Position		
พรรณนิจี๊วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	-2.04E-04	-6.03E-04
Standard Deviation	0.0023	0.0011
RMS Error	0.0023	0.0013
Maximum	0.009	2.61E-04
Minimum	-0.0169	-0.0047
Max. – Min.	0.0259	0.005

ตาราง 5.2 ค่าพรรณนิจี๊วคของระบบ สำหรับ Vertical Velocity

Vertical Velocity		
พรรณนิจี๊วค	สำหรับกรณีที่ไม่มีความควบคุม	สำหรับกรณีที่มีความควบคุมแบบ LQG
Mean	-4.97E-08	-3.74E-05
Standard Deviation	0.0286	0.0086
RMS Error	0.0286	0.0086
Maximum	0.169	0.0233
Minimum	-0.2184	-0.0668
Max. – Min.	0.3874	0.0902

การเปรียบเทียบ Vertical Position และ Vertical Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีความควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.1 ค่าสูงสุดของ Vertical Position สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.009 m ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Vertical Position สำหรับกรณีที่รถยนต์มีความควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.00026 m หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีความควบคุมแบบ LQG จะมีระยะเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินลดลง 97% ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีความควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

พิจารณาจากตารางที่ 5.2 ค่าสูงสุดของ Vertical Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.169 m/s ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Vertical Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์มีความควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0233 m/s หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีความควบคุมแบบ LQG จะมีความเร็วของตัวรถยนต์ในแนวดิ่งเมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินลดลง 86% ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีความควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

5.1.2 Pitch Angle และ Pitch Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Impulse Road Profile** ค่าของครรชนีชีวัดของระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4 สำหรับ Pitch Angle และ Pitch Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.3 ค่าครรชนีชีวัดของระบบ สำหรับ Pitch Angle

Pitch Angle		
ครรชนีชีวัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	2.75E-04	5.36E-04
Standard Deviation	0.0031	9.87E-04
RMS Error	0.0031	0.0011
Maximum	0.0227	0.0041
Minimum	-0.0121	-4.04E-04
Max. – Min.	0.0348	0.0045

ตาราง 5.4 ค่าครรชนีชีวัดของระบบ สำหรับ Pitch Velocity

Pitch Velocity		
ครรชนีชีวัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	7.76E-08	5.82E-05
Standard Deviation	0.0384	0.0107
RMS Error	0.0384	0.0107
Maximum	0.2936	0.0571
Minimum	-0.2273	-0.0405
Max. – Min.	0.5208	0.0976

การเปรียบเทียบ Pitch Angle และ Pitch Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.3 ค่าสูงสุดของ Pitch Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุม มีค่า 0.0227 rad ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Pitch Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.4 ค่าสูงสุดของ Pitch Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.2936 rad/s ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Pitch Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0571 rad/s หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีความเร็วเชิงมุมในแนวการกระดอนของตัวรถยนต์(โยกตัวในแนวหัว-ท้าย ของตัวรถยนต์)เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินลดลง 80.6 % ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

5.1.3 Roll Angle และ Roll Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Impulse Road Profile** ค่าของดัชนีชี้วัดของระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 สำหรับ Roll Angle และ Roll Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.5 ค่าดัชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Roll Angle

ดัชนีชี้วัด	Roll Angle	
	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	-1.83E-08	-6.89E-05
Standard Deviation	4.98E-04	5.22E-04
RMS Error	4.98E-04	5.27E-04
Maximum	0.0018	8.62E-04
Minimum	-0.002	-0.0034
Max. – Min.	0.0038	0.0043

ตาราง 5.6 ค่าครรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Roll Velocity

Roll Velocity		
ครรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	3.09E-08	-3.57E-06
Standard Deviation	0.0052	0.0062
RMS Error	0.0052	0.0062
Maximum	0.0295	0.0392
Minimum	-0.0262	-0.0477
Max. – Min.	0.0557	0.0869

การเปรียบเทียบ Roll Angle และ Roll Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.5 ค่าสูงสุดของ Roll Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.0018 rad ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Roll Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0008 rad หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีระยะการโคลงของตัวรถยนต์(โยกตัวในแนวหัว-ท้าย ของตัวรถยนต์)เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินลดลง 55.5% ในส่วนของค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด จะมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้ศูนย์(ทศนิยมสามตำแหน่ง) ซึ่งผลที่ได้สำหรับรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG ก็มีได้บ่งชี้ที่สำคัญที่มีผลต่อระบบเมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุม

พิจารณาจากตารางที่ 5.6 ค่าสูงสุดของ Roll Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.0295 rad/s ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Roll Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0392 rad/s สำหรับกรณีนี้เราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีความเร็วเชิงมุมในแนวการโคลงตัวของตัวรถยนต์ (โยกตัวในแนวซ้าย-ขวาของตัวรถยนต์) เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินเพิ่มขึ้น 24.7 % ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่สูงกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับกรณีของ Sine Road Profile

5.2.1 Vertical Position และ Vertical Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Sine Road Profile** ค่าของดรรรชนีชี้วัดของระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 สำหรับ Vertical Position และ Vertical Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.7 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Vertical Position

Vertical Position		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	-6.57E-04	0.0011
Standard Deviation	0.1021	0.0116
RMS Error	0.1021	0.0116
Maximum	0.1533	0.0218
Minimum	-0.1533	-0.0166
Max. – Min.	0.3066	0.0384

ตาราง 5.8 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Vertical Velocity

Vertical Velocity		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	-0.0123	-4.57E-04
Standard Deviation	0.6354	0.0787
RMS Error	0.6355	0.0787
Maximum	0.9632	0.1269
Minimum	-0.9633	-0.1341
Max. – Min.	1.9265	0.2609

การเปรียบเทียบ Vertical Position และ Vertical Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.7 ค่าสูงสุดของ Vertical Position สำหรับกรณีที่ยานยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.1533 m ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Vertical Position สำหรับกรณีที่ยานยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0218 m หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีระยะเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 85.7%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0116 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1021 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 88.6%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

พิจารณาจากตารางที่ 5.8 ค่าสูงสุดของ Vertical Velocity สำหรับกรณีที่ยานยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.9632 m/s ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Vertical Velocity สำหรับกรณีที่ยานยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.1269 m/s หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าความเร็วเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 86.8%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0787 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6355 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 87.6%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุด และผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

5.2.2 Pitch Angle และ Pitch Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Sine Road Profile** ค่าของดรรรชนีชี้วัดของระบบซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.10 สำหรับ Pitch Angle และ Pitch Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.9 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Pitch Angle

Pitch Angle		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	8.56E-04	-0.0011
Standard Deviation	0.1358	0.0103
RMS Error	0.1358	0.0104
Maximum	0.2031	0.0148
Minimum	-0.2031	-0.0202
Max. – Min.	0.4062	0.035

ตาราง 5.10 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Pitch Velocity

Pitch Velocity		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	0.0163	9.60E-04
Standard Deviation	0.8453	0.0774
RMS Error	0.8454	0.0774
Maximum	1.2927	0.1369
Minimum	-1.2927	-0.1394
Max. – Min.	2.5854	0.2763

การเปรียบเทียบ Pitch Angle และ Pitch Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.9 ค่าสูงสุดของ Pitch Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.2031 rad ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Pitch Angle สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0148 rad หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีระยะกระดอนของตัวรถยนต์ในแนวหัว-ท้าย เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 92.7%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0104 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1358 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 92.3%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

พิจารณาจากตารางที่ 5.10 ค่าสูงสุดของ Pitch Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 1.2927 rad/s ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Pitch Velocity สำหรับกรณีที่รถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.1369 rad/s หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีความเร็วเชิงมุมของตัวรถยนต์ในแนวหัว-ท้าย เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 89.4%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0774 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8454 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 90.8%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

5.2.3 Roll Angle และ Roll Velocity

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีตัวควบคุมกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่โดยมีตัวควบคุมแบบ LQG เมื่อสภาพถนนเป็น **Sine Road Profile** ค่าของดรรรชนีชี้วัดของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า RMS Error แสดงดังตารางที่ 5.11 และตารางที่ 5.12 สำหรับ Roll Angle และ Roll Velocity ตามลำดับ

ตาราง 5.11 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Roll Angle

Roll Angle		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	-1.50E-04	-0.0014
Standard Deviation	0.0251	0.0143
RMS Error	0.0251	0.0143
Maximum	0.0398	0.0198
Minimum	-0.0398	-0.0277
Max. – Min.	0.0797	0.0475

ตาราง 5.12 ค่าดรรรชนีชี้วัดของระบบ สำหรับ Roll Velocity

Roll Velocity		
ดรรรชนีชี้วัด	สำหรับกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	สำหรับกรณีที่มีตัวควบคุมแบบ LQG
Mean	0.0039	0.0019
Standard Deviation	0.1593	0.0911
RMS Error	0.1593	0.0912
Maximum	0.25	0.1418
Minimum	-0.2499	-0.1372
Max. – Min.	0.4999	0.2789

การเปรียบเทียบ Roll Angle และ Roll Velocity ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวควบคุม และระบบที่มีตัวควบคุมแบบ LQG

พิจารณาจากตารางที่ 5.11 ค่าสูงสุดของ Roll Angle สำหรับกรณีที่ยานยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.0398 rad ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Roll Angle สำหรับกรณีที่ยานยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.0198 rad หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีระยะการโคลงตัวของตัวรถยนต์ในแนวซ้าย-ขวา เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 50.3%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0143 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0251 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 43.0%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

พิจารณาจากตารางที่ 5.12 ค่าสูงสุดของ Roll Velocity สำหรับกรณีที่ยานยนต์ไม่มีตัวควบคุมมีค่า 0.25 rad ในขณะที่ค่าสูงสุดของ Roll Angle สำหรับกรณีที่ยานยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG มีค่าเป็น 0.1418 rad หรือกล่าวได้ว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีความเร็วเชิงมุมการโคลงตัวของตัวรถยนต์ในแนวซ้าย-ขวา เมื่อเจอสภาพถนนที่เป็นหลุมหรือเนินแบบต่อเนื่องลดลง 43.3%

สำหรับค่าของ RMS Error นั้นเราพบว่ารถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่า RMS Error อยู่ที่ 0.0912 ซึ่งจะน้อยกว่าค่า RMS Error สำหรับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1593 โดยที่ค่าของ RMS Error ลดลง 42.7%

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดและผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าของดัชนีชี้วัดที่ต่ำกว่ารถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบรองรับกันสะเทือน (Suspension System) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในรถยนต์ซึ่งนอกจากจะมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักของตัวรถและลดการสั่นสะเทือนแล้ว ยังเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้สมรรถนะในการขับขี่ดีขึ้น ระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม จะถูกออกแบบเพื่อรองรับผลกระทบเนื่องจากสภาพถนน น้ำหนักบรรทุก และความนุ่มนวลในการขับขี่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมจะเป็นระบบรองรับกันสะเทือนที่เพิ่มอุปกรณ์ ควบคุมแรงเข้าไปในระบบรองรับกันสะเทือน เปรียบเสมือนกับการทำให้ค่าคงที่ของสปริงและหรือตัวหน่วงปรับค่าได้ โดยค่าที่ปรับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับสภาพการเปลี่ยนแปลงของถนน และน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลของตัวรถดีขึ้น

งานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาถึงการใช้ระบบควบคุมแบบ LQG ในการควบคุมระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม การศึกษาถึงพฤติกรรมและสมรรถนะของระบบ อาศัยการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้แบบจำลองเต็มของรถยนต์เป็นต้นแบบในการจำลองการขับขี่ สำหรับสภาพถนนที่เปลี่ยนแปลงไป ในการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณีดังนี้

1. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม โดยจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่เป็นหลุมหรือเนิน (รูปแบบสัญญาณเป็น Impulse Road Profile)
2. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่เพิ่มเติมตัวควบคุมแบบ LQG เข้าไปในระบบ และจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่เป็นหลุมหรือเนิน
3. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม โดยจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่ขรุขระสม่ำเสมอ(รูปแบบสัญญาณเป็น Sine Road Profile)
4. จำลองการทำงานของรถยนต์ในสถานะที่เพิ่มเติมตัวควบคุมแบบ LQG เข้าไปในระบบ และจำลองสัญญาณรบกวนของผิวถนนที่ขรุขระสม่ำเสมอ

โดยทุกกรณีจะทำการจำลองระบบเพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะในการขับขี่รถยนต์ซึ่งประกอบด้วย Vertical Displacement, Vertical Velocity, Pitch Angle, Pitch Velocity, Roll Angle และ Roll Velocity

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ใช้ครุชชีว์วัดสมรรถนะ 2 อย่าง คือ Root Mean Square of error, และค่าสูงสุด (Maximum) เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในแต่ละกรณี จากข้อมูลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ชี้ให้เห็นว่า ระบบรองรับกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีสมรรถนะที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบรองรับกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม ดังรายละเอียด

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Vertical Position ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 97% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Vertical Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 86% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Pitch Angle ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 81.9% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Pitch Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 80.6% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Roll Angle ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 55.5% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าสูงสุดของ Roll Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าเพิ่มขึ้น 24.7% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่า RMS error ของ Vertical Position ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 88.6% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่า RMS error ของ Vertical Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 87.6% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่าRMS error ของ Pitch Angle ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 92.3% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่าRMS error ของ Pitch Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 90.8% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่าRMS error ของ Roll Angle ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 43.0% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ภายใต้สภาพถนนที่เป็น Sine Road Profile ค่าRMS error ของ Roll Velocity ของรถยนต์มีตัวควบคุมแบบ LQG จะมีค่าลดลง 42.7% เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ไม่มีตัวควบคุม

นอกจากดัชนีชี้วัดที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว สำหรับกรณีที่สภาพถนนที่เป็น Impulse Road Profile ค่าของเวลาคงตัว (Settling Time) ของรถยนต์ที่มีตัวควบคุมแบบ LQG ยังลดลงทุกกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ปราศจากตัวควบคุม

6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

จากผลการทำวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยพบว่ามีข้อควรศึกษาเพิ่มเติม โดยการทำวิจัยดังต่อไปนี้

1. การยืนยัน (Verification) ข้อมูลจากการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยทำการใช้ข้อมูลจริงของรถยนต์หลากหลายรุ่นมากขึ้น (งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลรถยนต์ BMW 318IA เพียงรุ่นเดียวเท่านั้น)
2. การยืนยัน (Verification) ข้อมูลจากการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการทดลองและเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์จริง



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

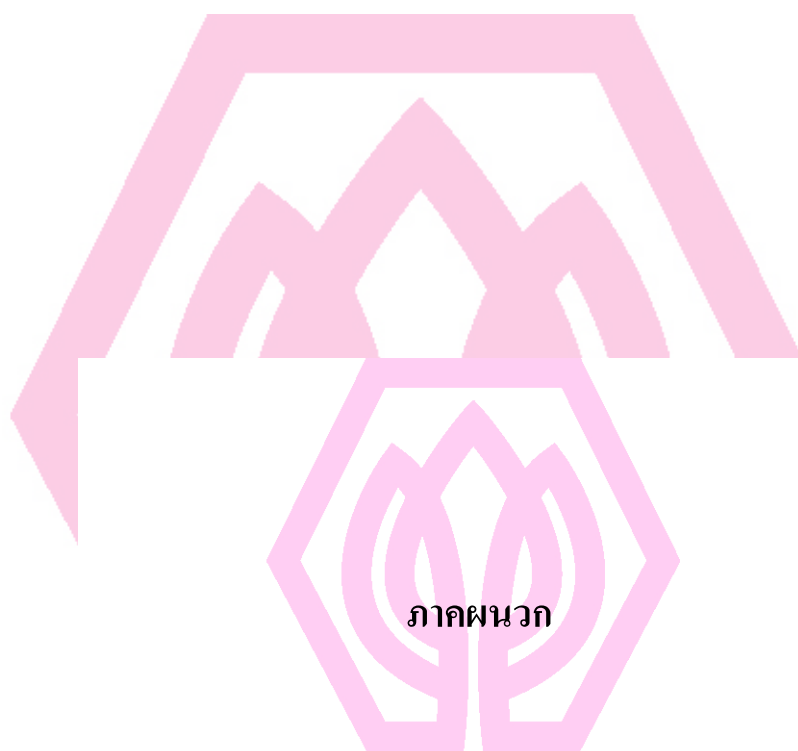
บรรณานุกรม

- รัฐพงศ์ ปฏิภาณัง และ บุญสร้าง ดิเรกสถาพร “ การควบคุมแบบฟีดแบ็ค สำหรับระบบกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของยานพาหนะ” Proceeding of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand , 19-21 October 2005 , Thailand.
- ปนัดดา นิรนาทลำพองศ์ และคนอื่น ๆ 2545. การลึกลง: ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2545.
- ทวีวัชร วีระแก้ว และ ปเสกฐา สารลักษณ์ “การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดกับการใช้ความถี่สูงสุดในระบบพลศาสตร์ ” Proceeding of the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand , 19-21 October 2005 , Thailand.
- [Hyun-Chul Sohn](#), [Kyung-Tae Hong](#), [Keum-Shik Hong](#), and [Wan-Suk Yoo](#), “An adaptive LQG control for semi-active suspension systems” [International Journal of Vehicle Design](#). [34, 4 : 309 - 326](#).
- Hyo-Jun Kim, Hyun Seok Yang, and Young-Pil Park. “Improving the Vehicle Performance with Active Suspension Using Road-sensing Algorithm”. *Computers & Structures*. 80, 18 (July) : 1569-1577.
- M.C. Smith and G.W. Walker. 1997. “ Performance Limitations for Active and Passive Suspensions”. *Proceedings of the European Control Conference 1997*, 1-4 July, 1997, Brussels: Belgium.
- Gavin W. Walker, “ An Introduction to Active Suspension System”
WWW.control.eng.cam.ac.uk/gww/gww.html
- Amin, Jayesh, B. Friedland, and A. Harnoy. 1997. “Implementation of a Friction Estimation and Compensation Technique”. *IEEE Control System Magazine*. 17, 4 (August) : 71-76.
- Armstrong, Brian. 1988. “Friction: Experimental determination, modeling and compensation”. *Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 3 (April) : 1422-1427.
- Dahl, P.R. 1976. “Solid friction damping of mechanical vibrations”. *AIAA J.* 14(12) : 1675-1682
- Friedland, Bernard and Young-Jin Park. 1992. “On adaptive friction compensation”. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 37,10 (October): 1609-1612.
- Gomonwattanapanich, Opart. 2003. *Identification and Compensation of Friction in Mechanical Systems with Stochastic Inputs*. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Arlington.
- Kim, Jong-Hwan, Hong-Kook Chae, Jeong-Yul Jeon, and Seon-Woo Lee. 1995. “Identification and control of systems with friction using accelerated evolutionary programming”. *IEEE Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*, Singapore (July): 38-47.

Kim, Young Ho and Frank L. Lewis. 2000. "Reinforcement adaptive learning neural-net-based friction compensation control for high speed and precision". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 8, 1 (January): 118-126.



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY



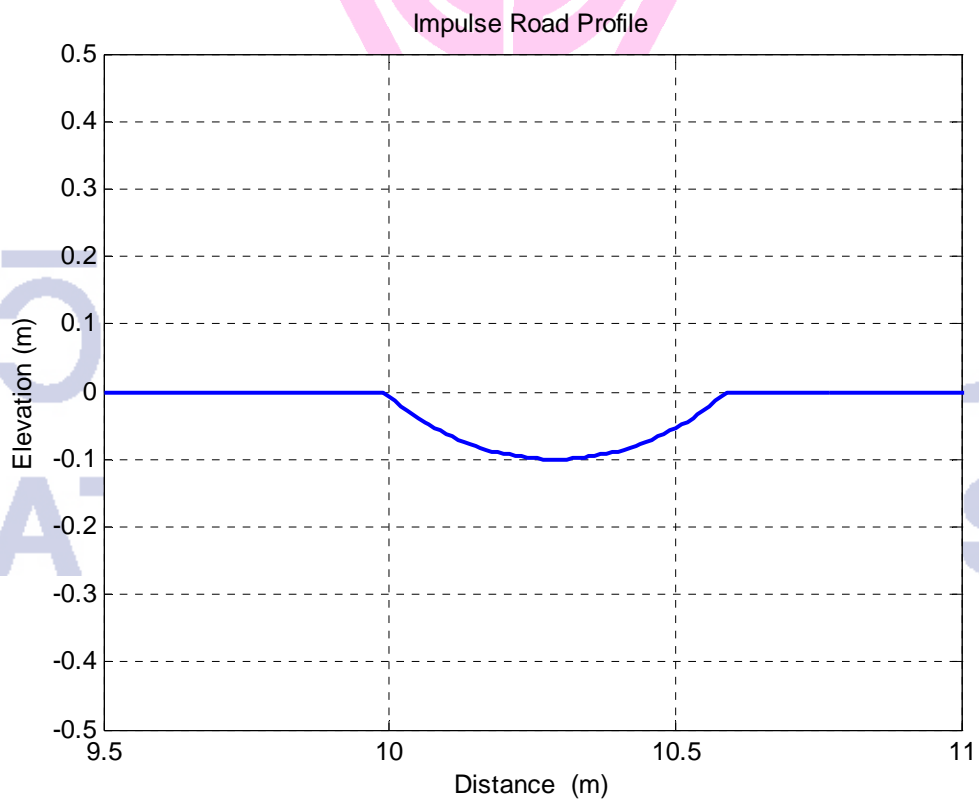
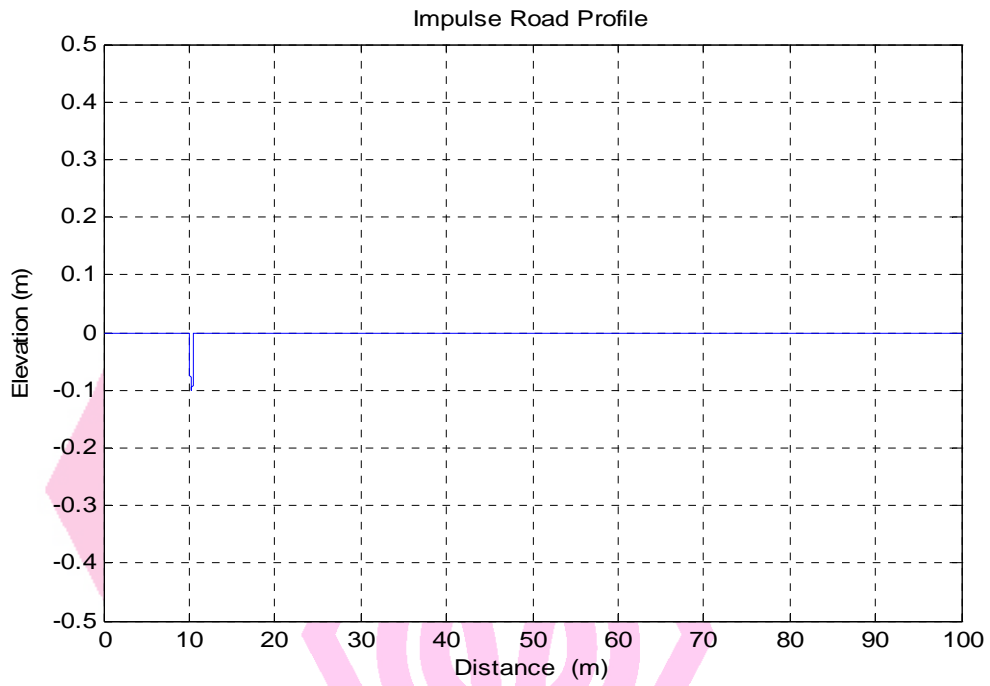
ภาคผนวก ก

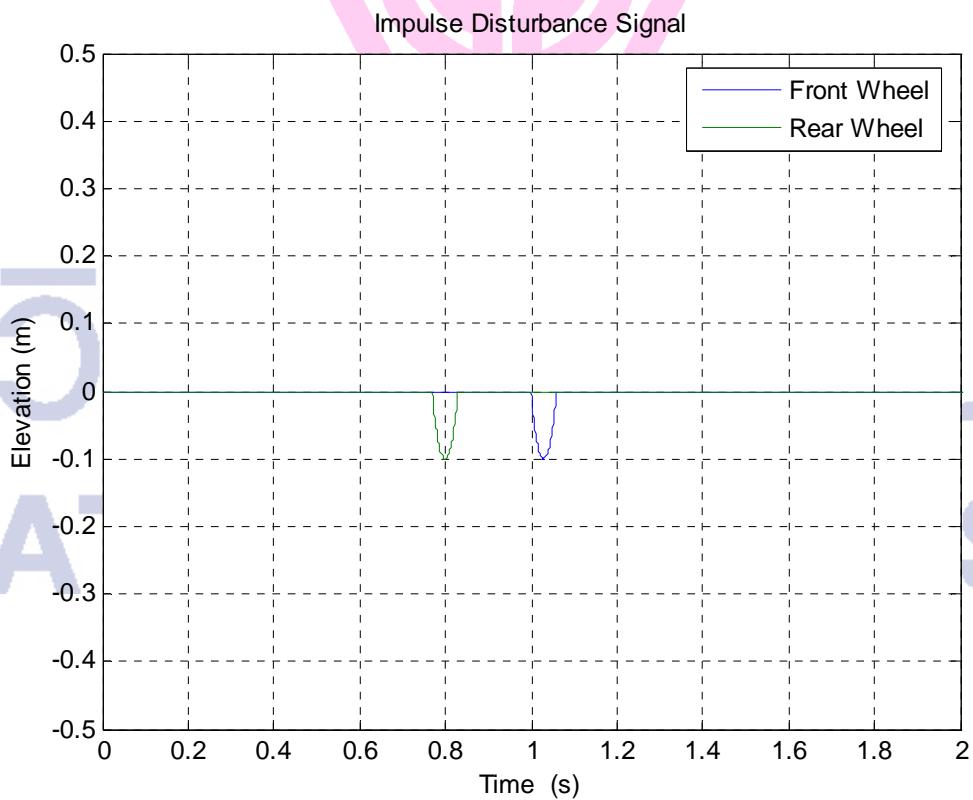
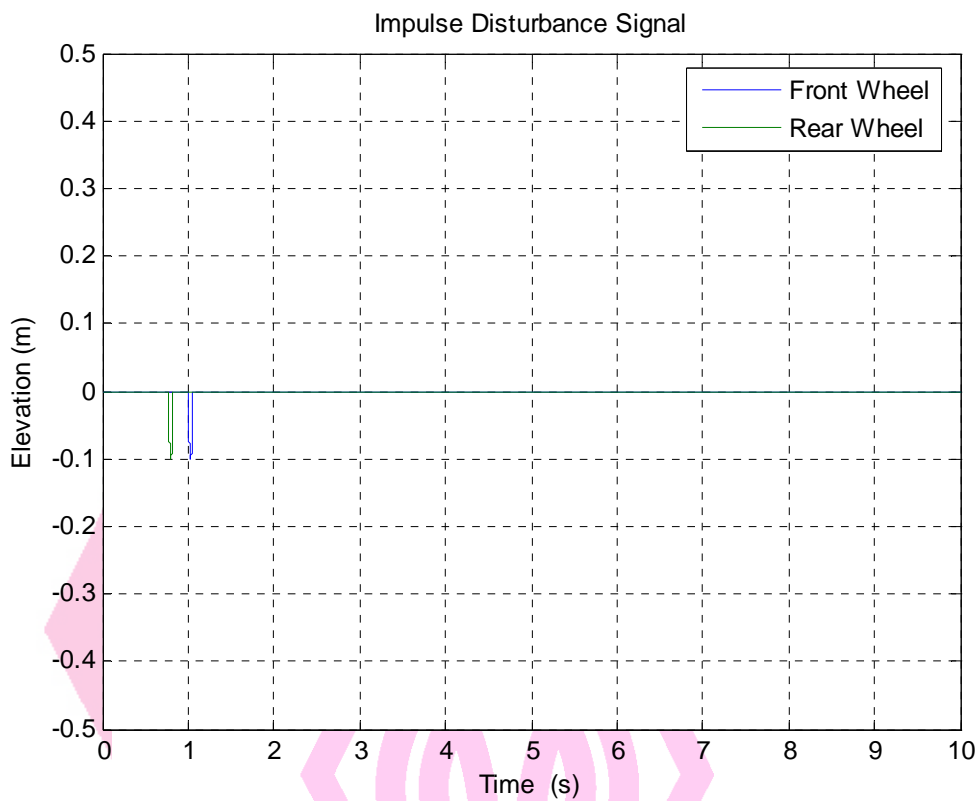
กราฟข้อมูลการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

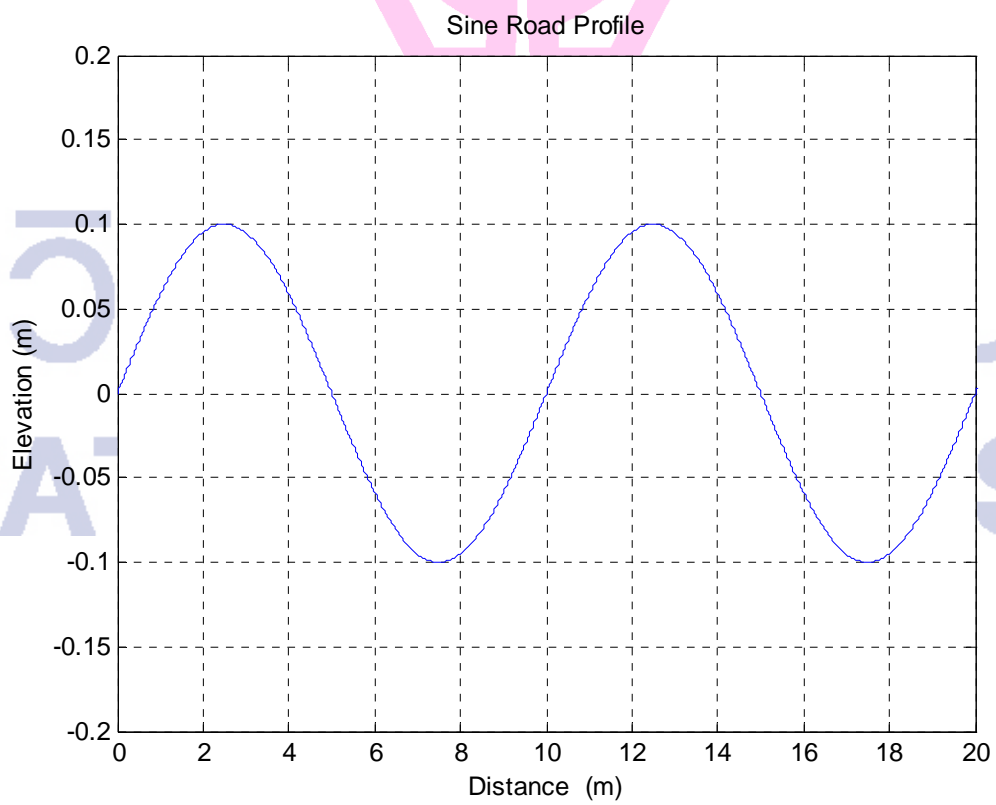
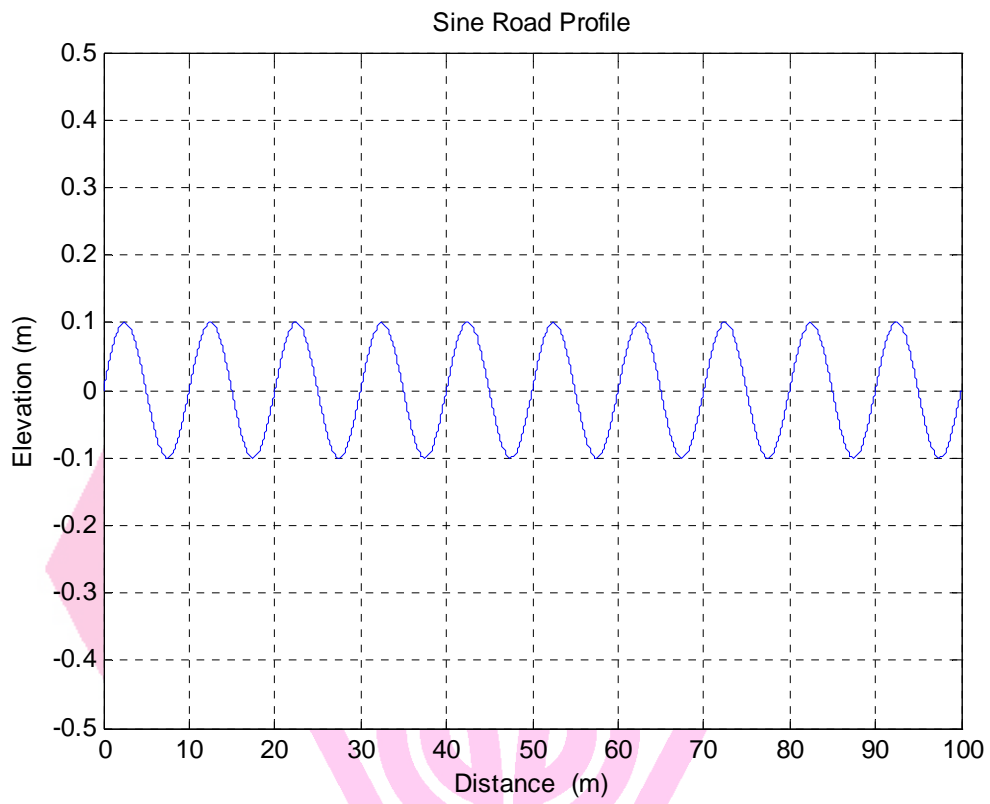
1. Road Profile

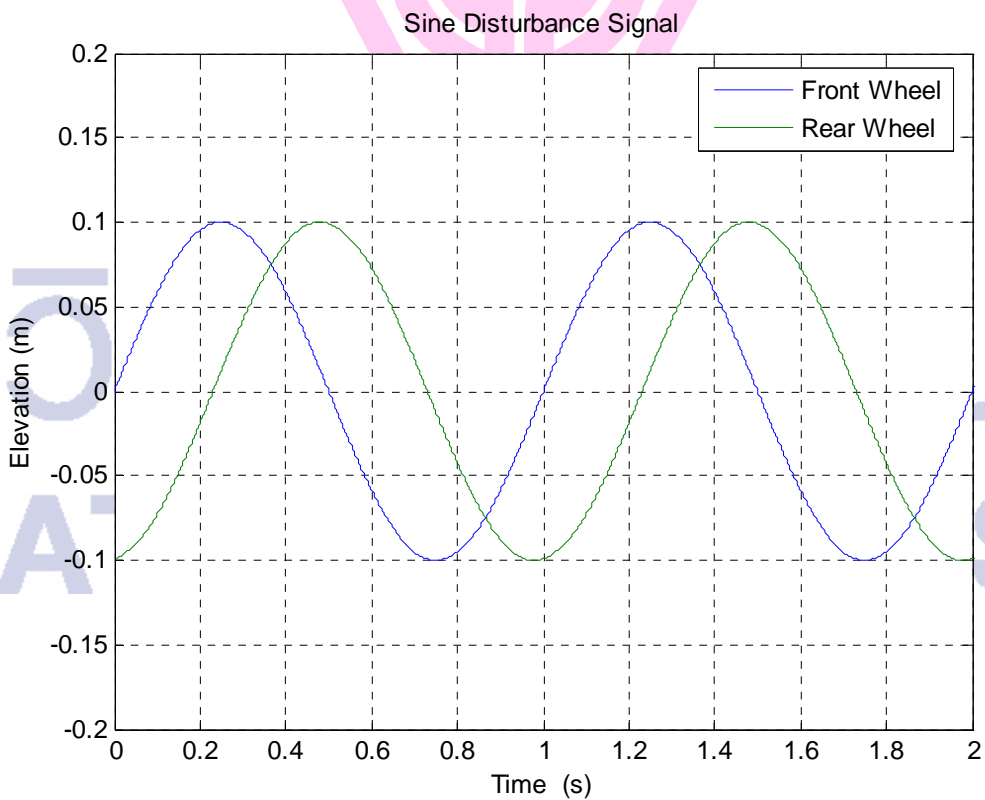
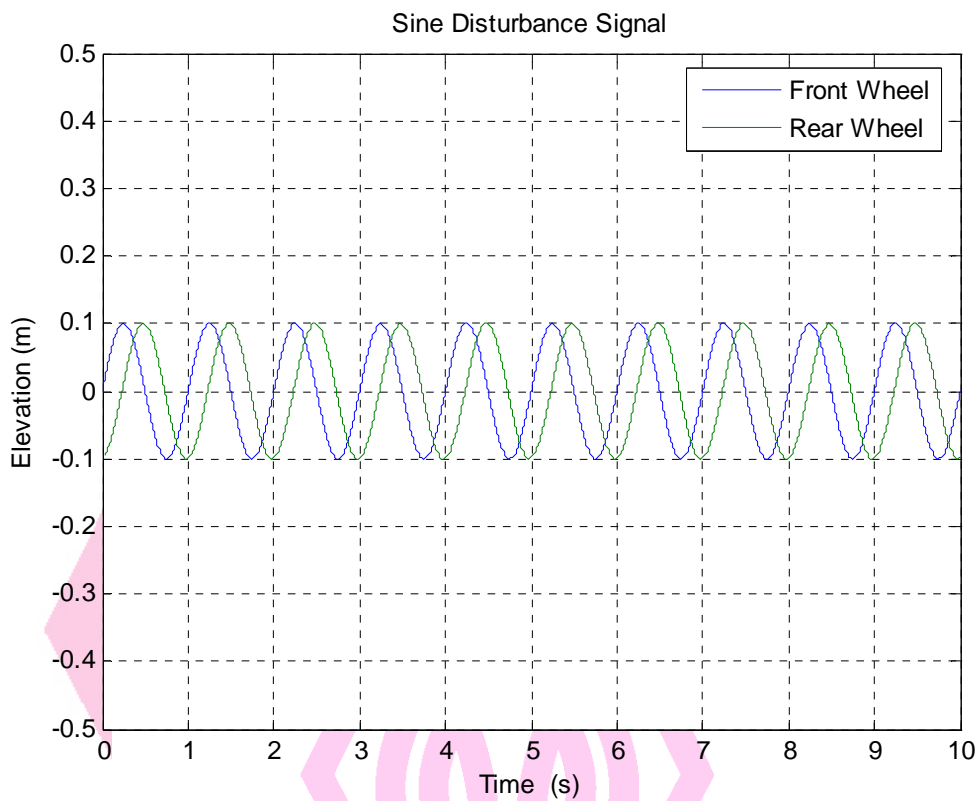
1.1 Impulse Signal





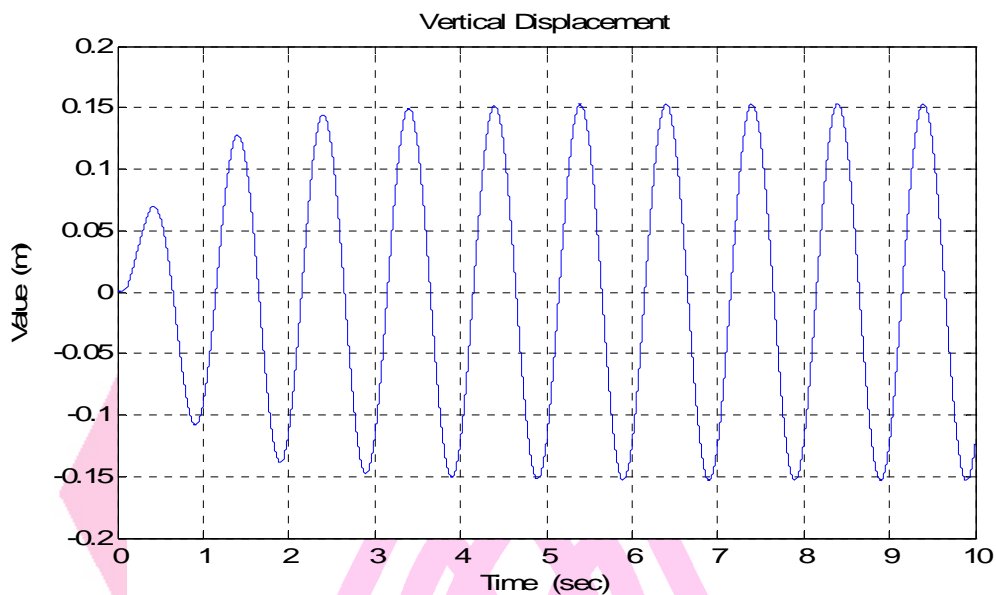
1.2 Sine Signal



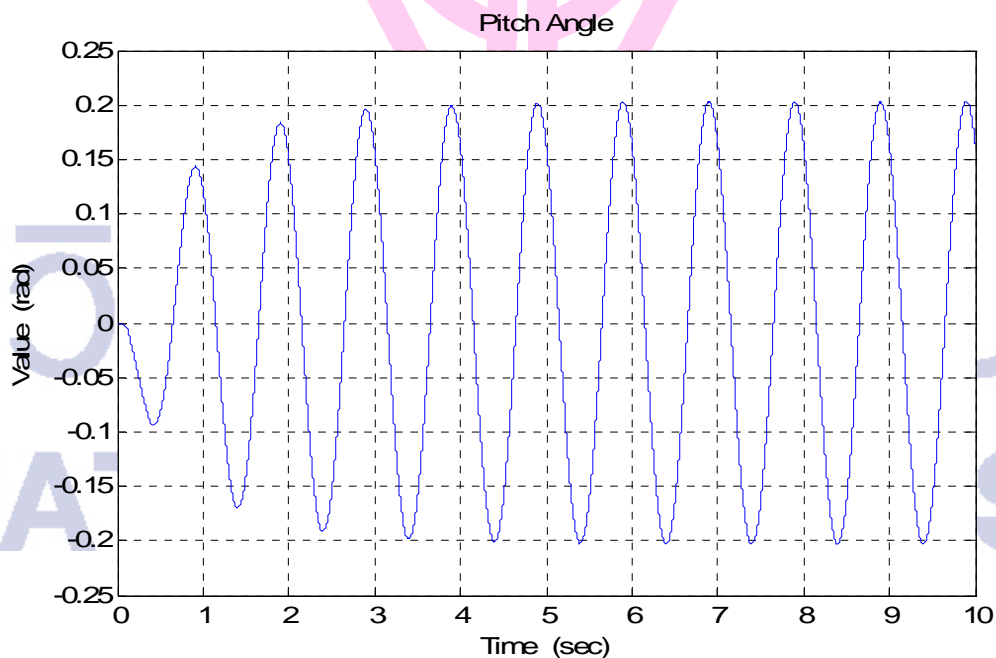


2. Plot of Simulations Results

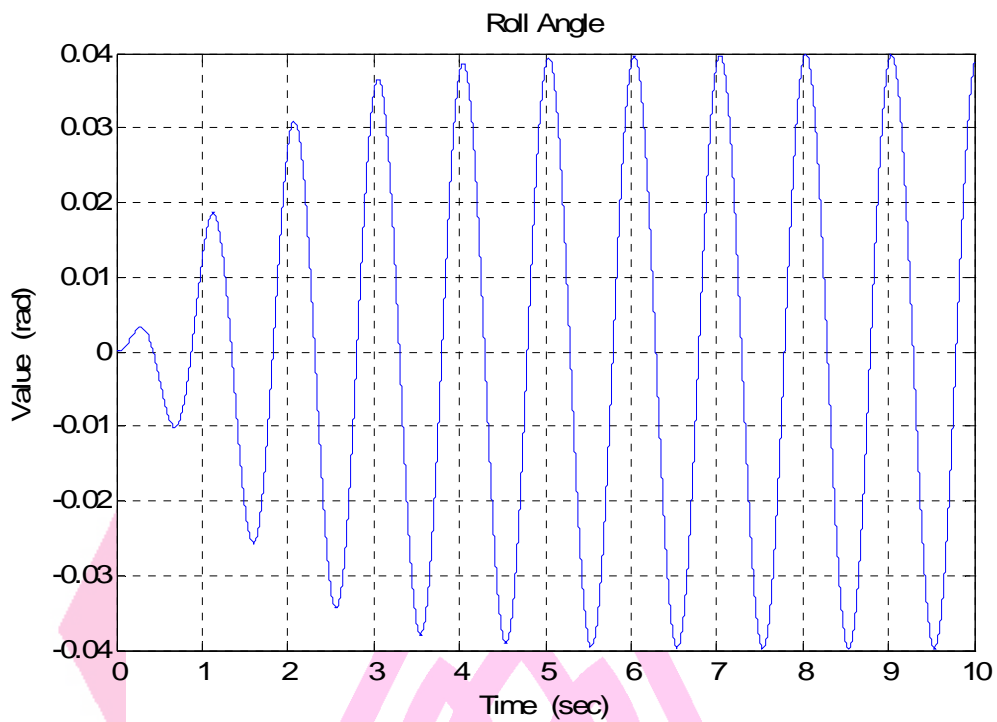
2.1 Sine Profile



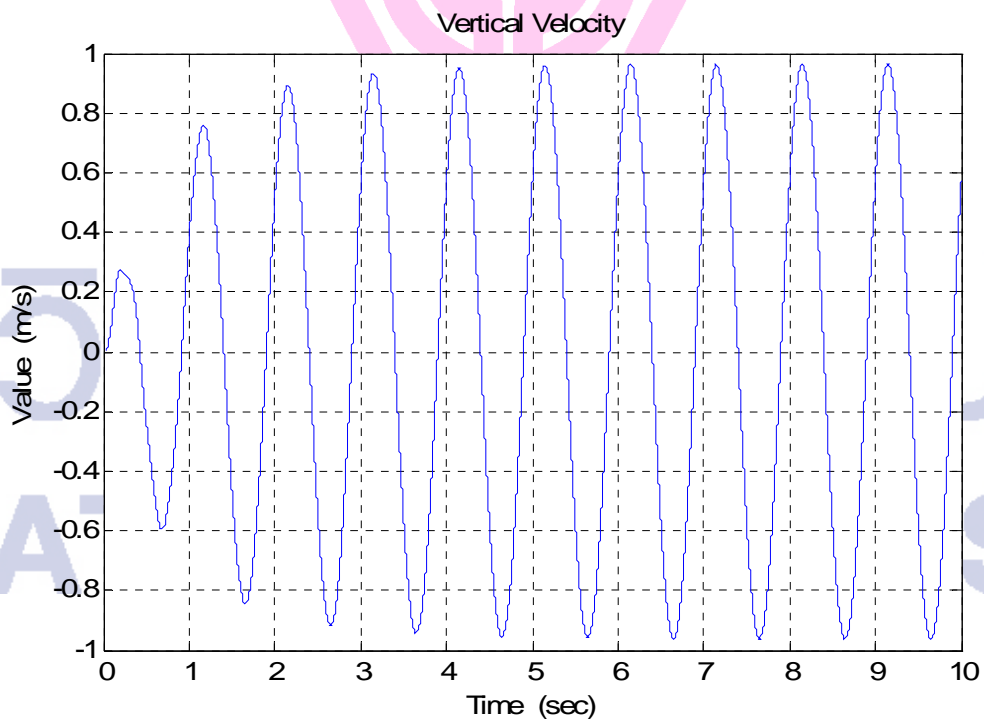
Mean = -0.00065666 m, STD = 0.10207 m, RMS = 0.10208 m
Max = 0.15331 m, Min = -0.15331 m, Max-Min = 0.30662 m



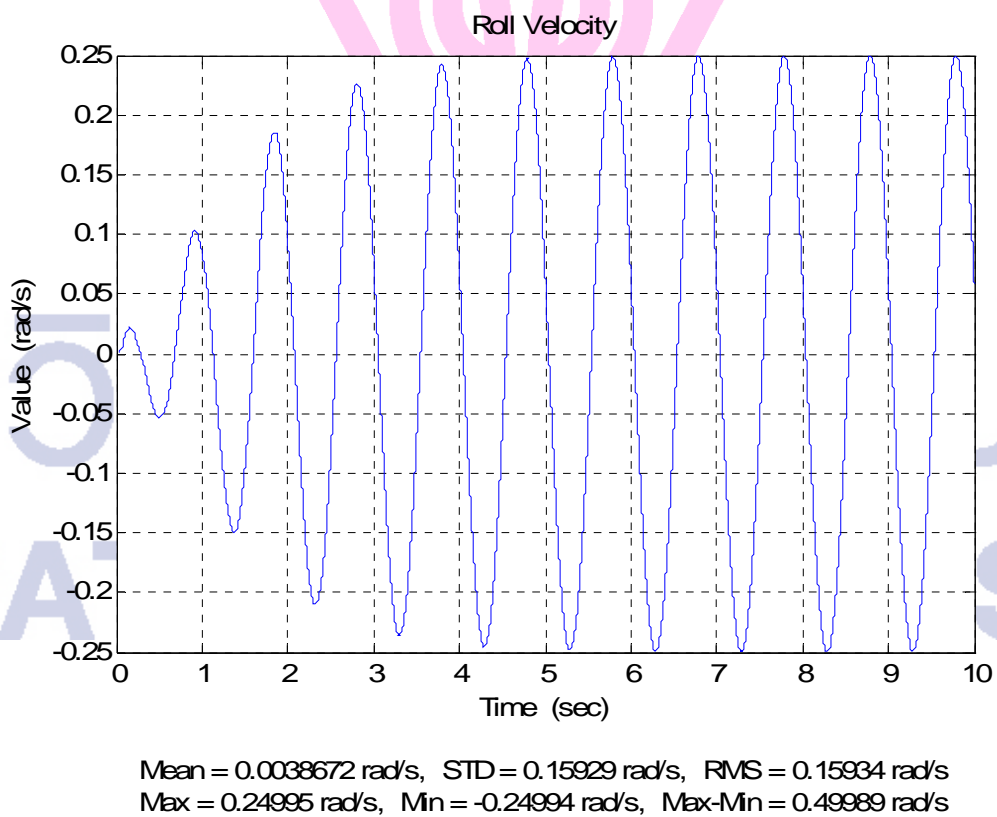
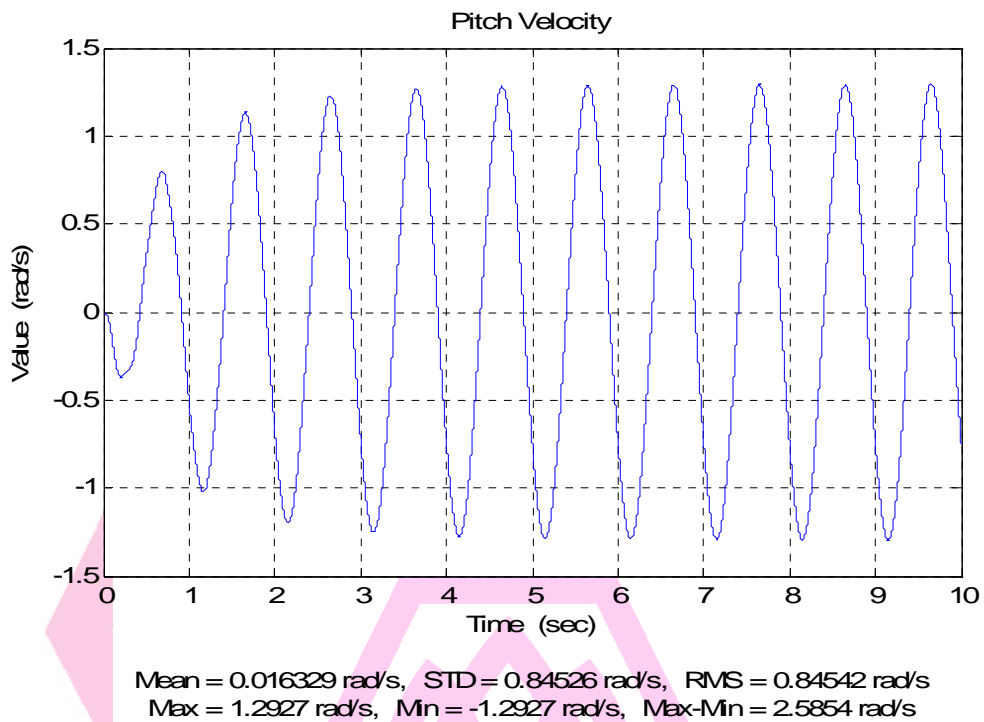
Mean = 0.00085613 rad, STD = 0.13578 rad, RMS = 0.13578 rad
Max = 0.20311 rad, Min = -0.2031 rad, Max-Min = 0.40621 rad



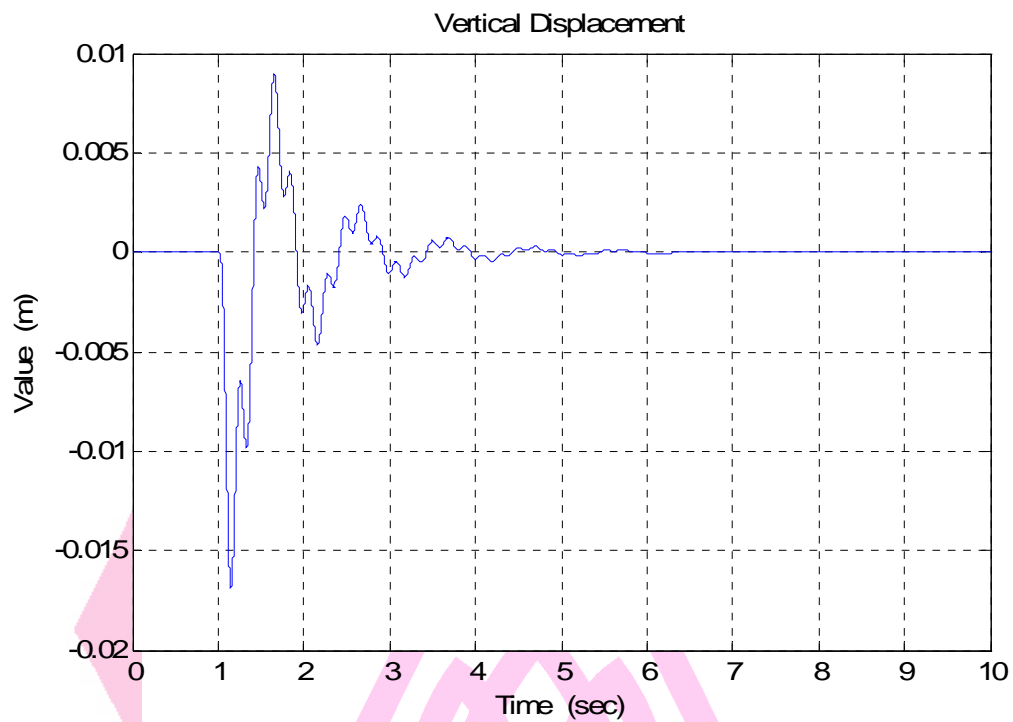
Mean = -0.00014972 rad, STD = 0.025123 rad, RMS = 0.025123 rad
Max = 0.039828 rad, Min = -0.039831 rad, Max-Min = 0.07966 rad



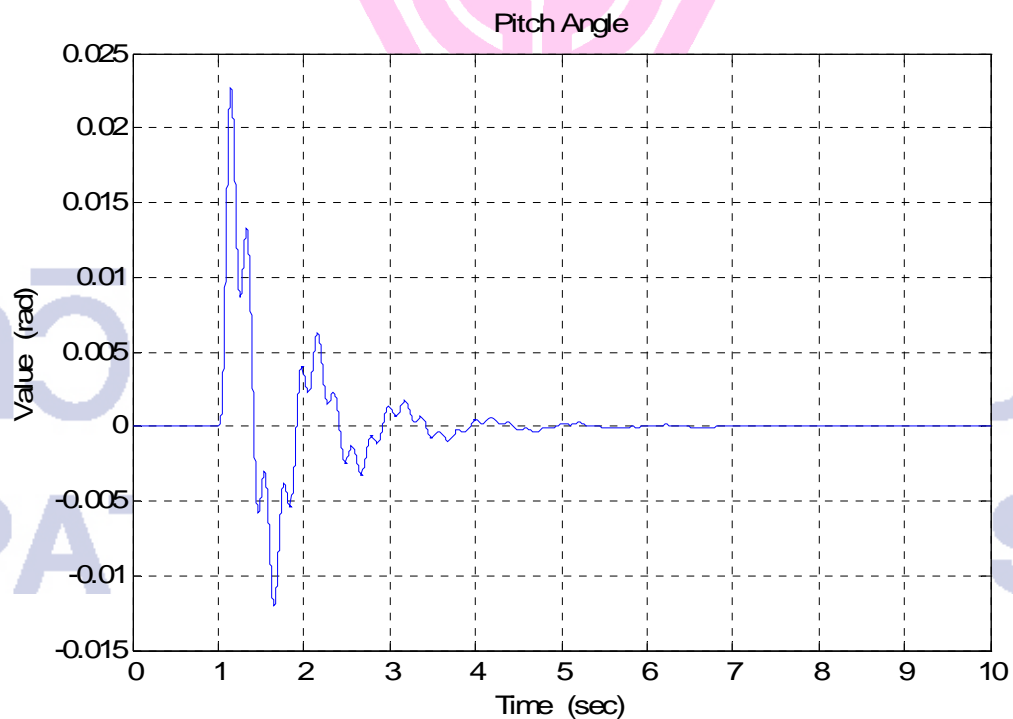
Mean = -0.012289 m/s, STD = 0.63542 m/s, RMS = 0.63553 m/s
Max = 0.96322 m/s, Min = -0.96326 m/s, Max-Min = 1.9265 m/s



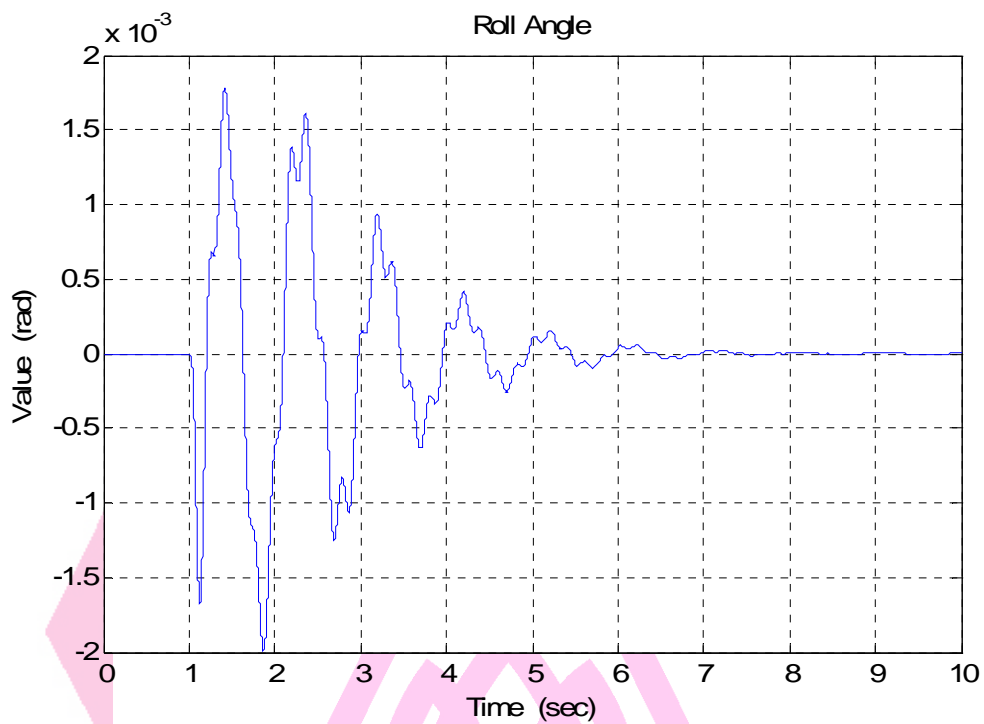
2.2 Impulse Profile



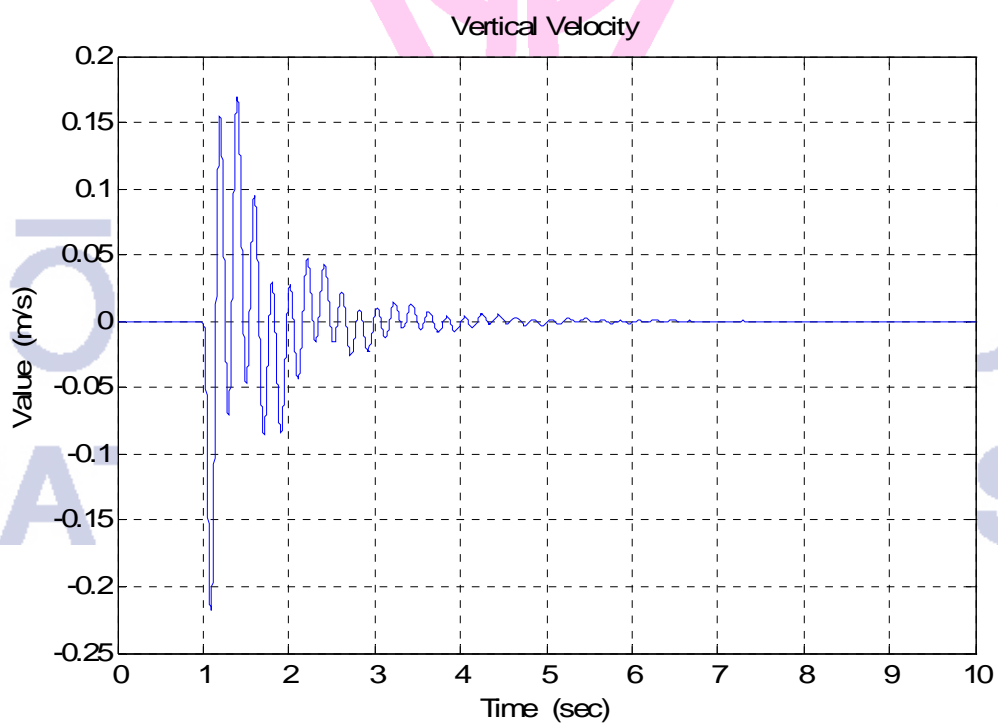
Mean = -0.00020427 m, STD = 0.002313 m, RMS = 0.002322 m
Max = 0.0089725 m, Min = -0.016919 m, Max-Min = 0.025891 m



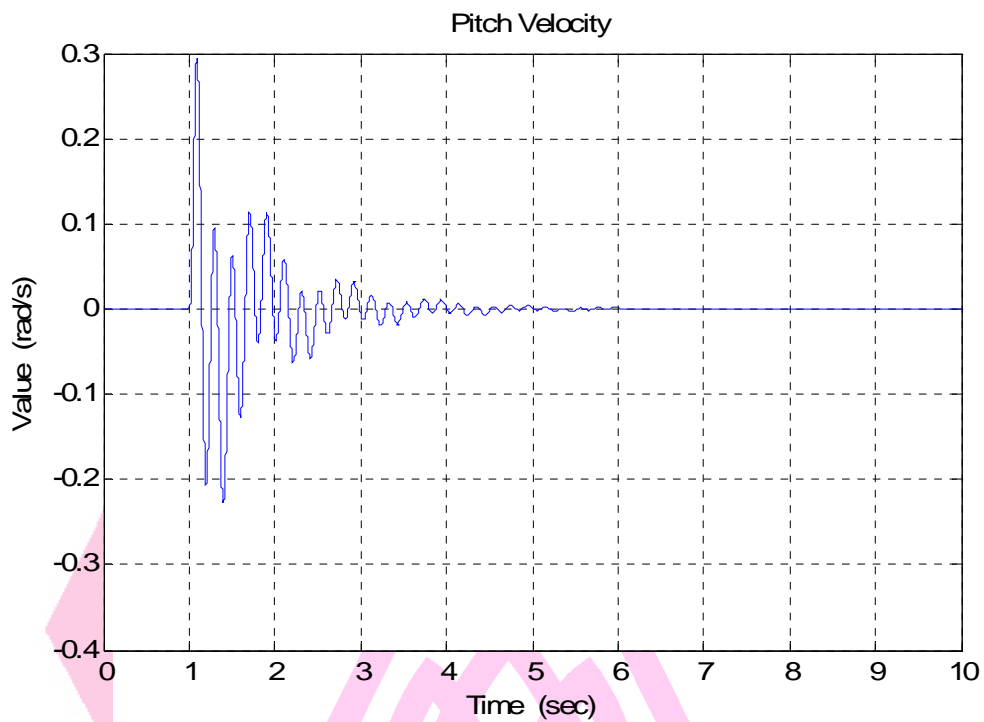
Mean = 0.00027471 rad, STD = 0.0031111 rad, RMS = 0.0031232 rad
Max = 0.022741 rad, Min = -0.012071 rad, Max-Min = 0.034812 rad



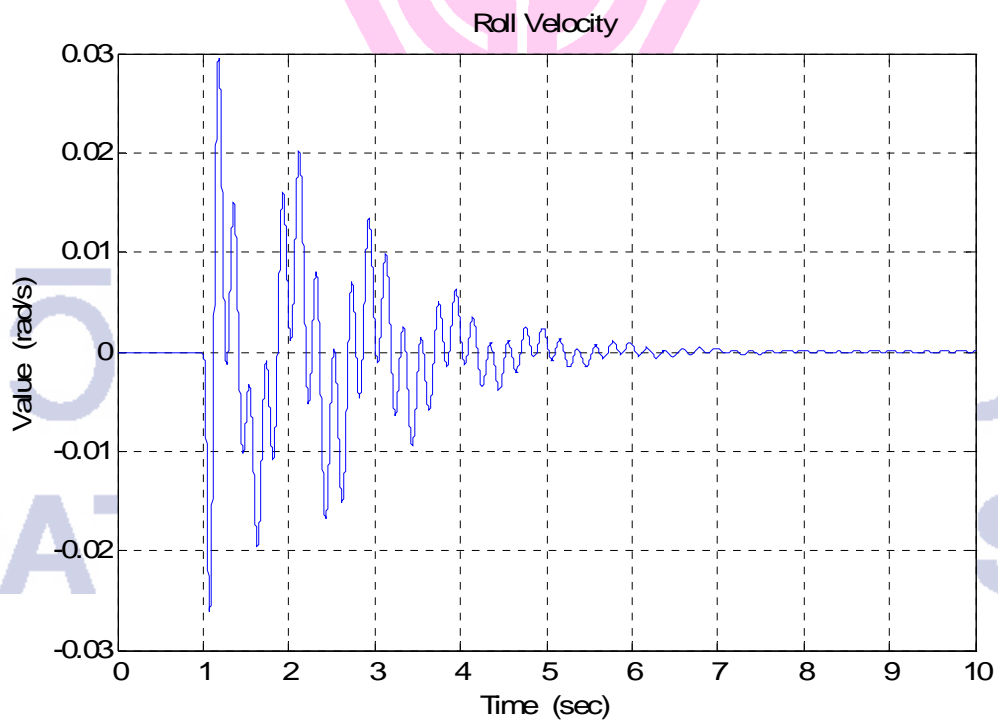
Mean = -1.8276×10^{-8} rad, STD = 0.00049827 rad, RMS = 0.00049827 rad
Max = 0.0017822 rad, Min = -0.0019905 rad, Max-Min = 0.0037727 rad



Mean = -4.9744×10^{-8} m/s, STD = 0.028566 m/s, RMS = 0.028566 m/s
Max = 0.16902 m/s, Min = -0.21842 m/s, Max-Min = 0.38744 m/s



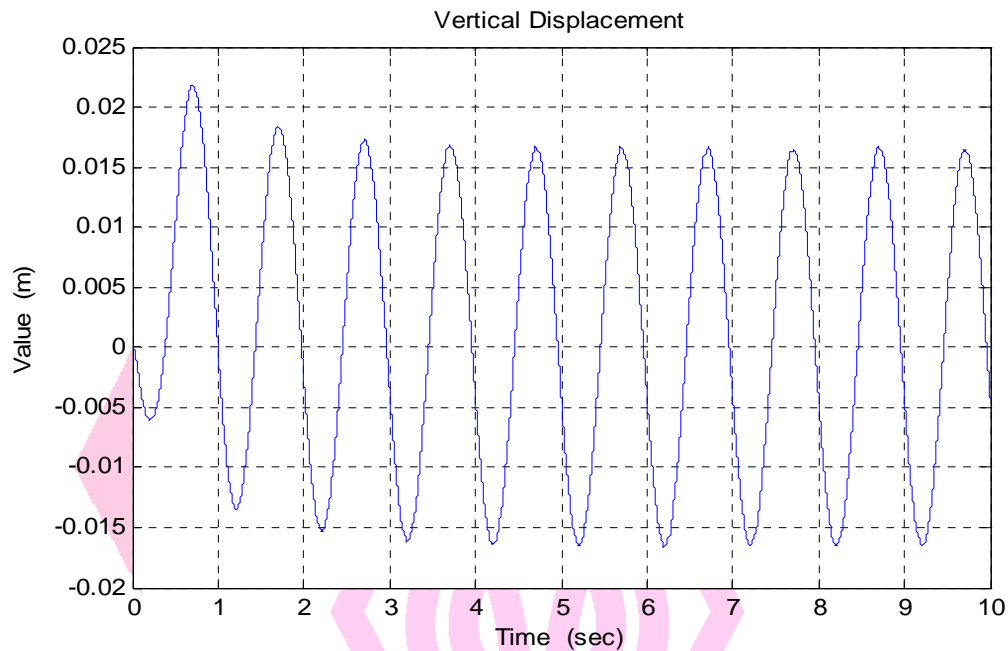
Mean = 7.7637×10^{-8} rad/s, STD = 0.03841 rad/s, RMS = 0.03841 rad/s
Max = 0.29356 rad/s, Min = -0.22728 rad/s, Max-Min = 0.52084 rad/s



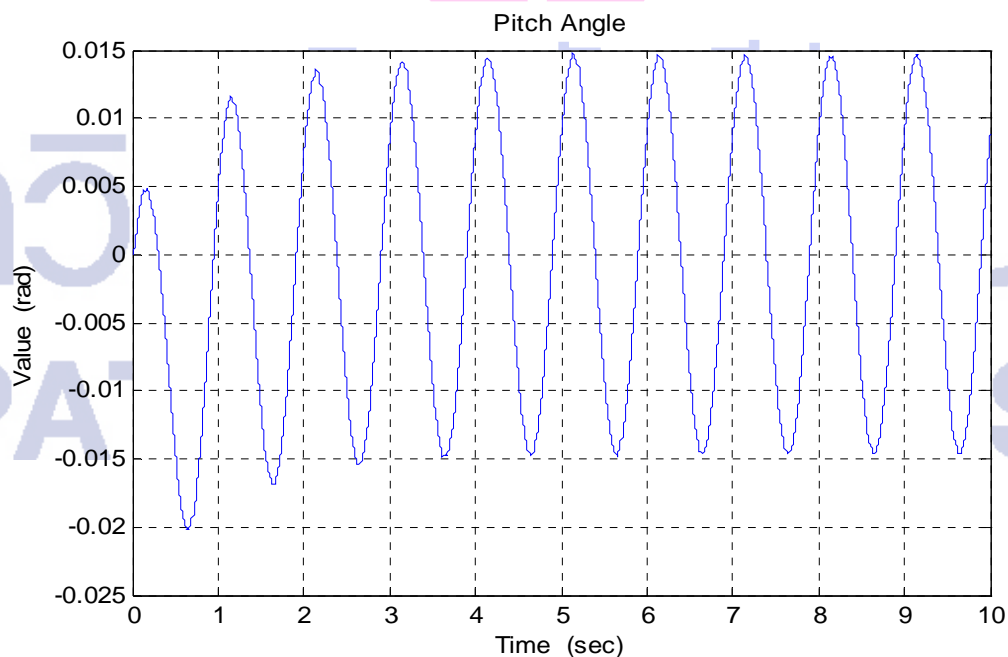
Mean = 3.0891×10^{-8} rad/s, STD = 0.0052008 rad/s, RMS = 0.0052008 rad/s
Max = 0.029528 rad/s, Min = -0.026208 rad/s, Max-Min = 0.055735 rad/s

3. Simulations with $R_{lqr} = 1e-5$ ($Q_{lqr} = 1e4$ [minimize Position and Velocity], $Q_{kf} = 1e4$, $R_{kf} = 0.1$)

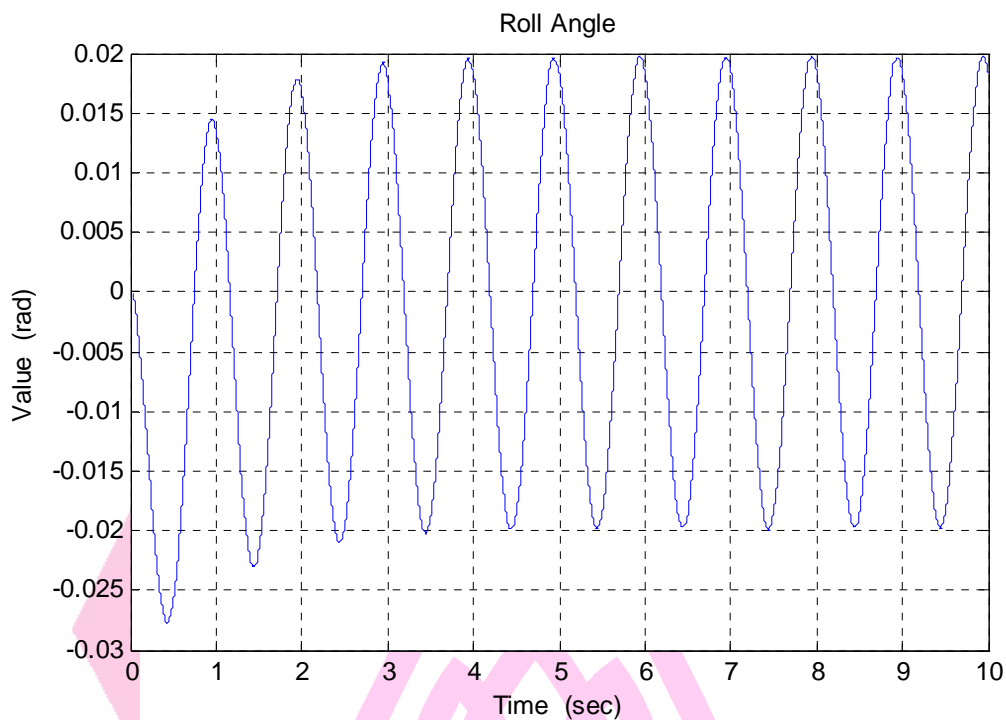
3.1 Sine Profile



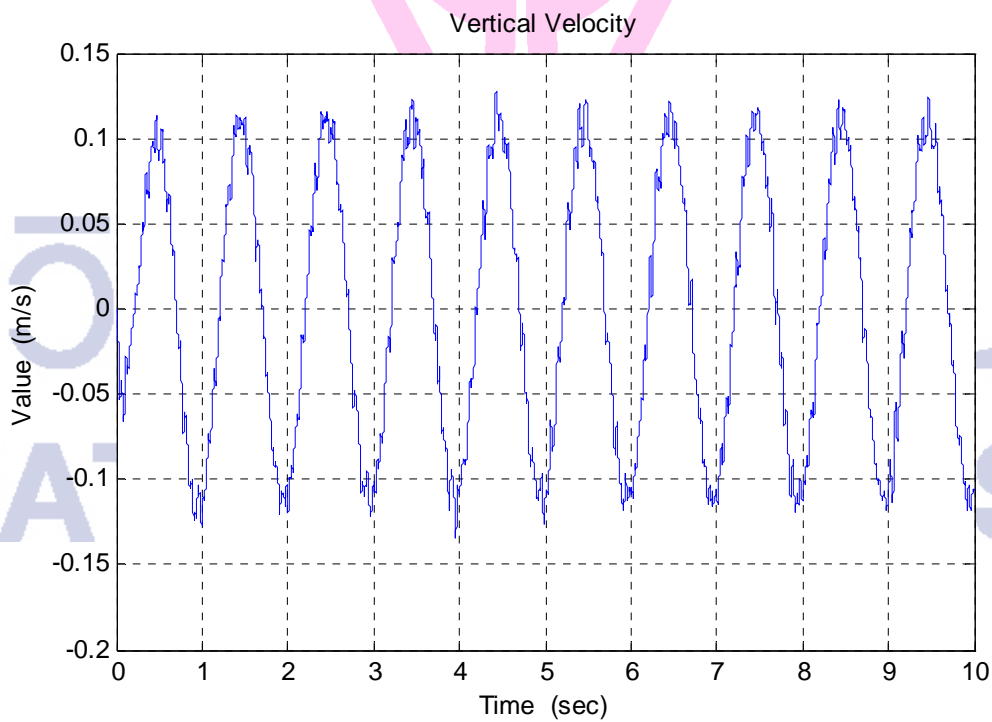
Mean = 0.0010676 m, STD = 0.011599 m, RMS = 0.011648 m
Max = 0.021819 m, Min = -0.016601 m, Max-Min = 0.03842 m



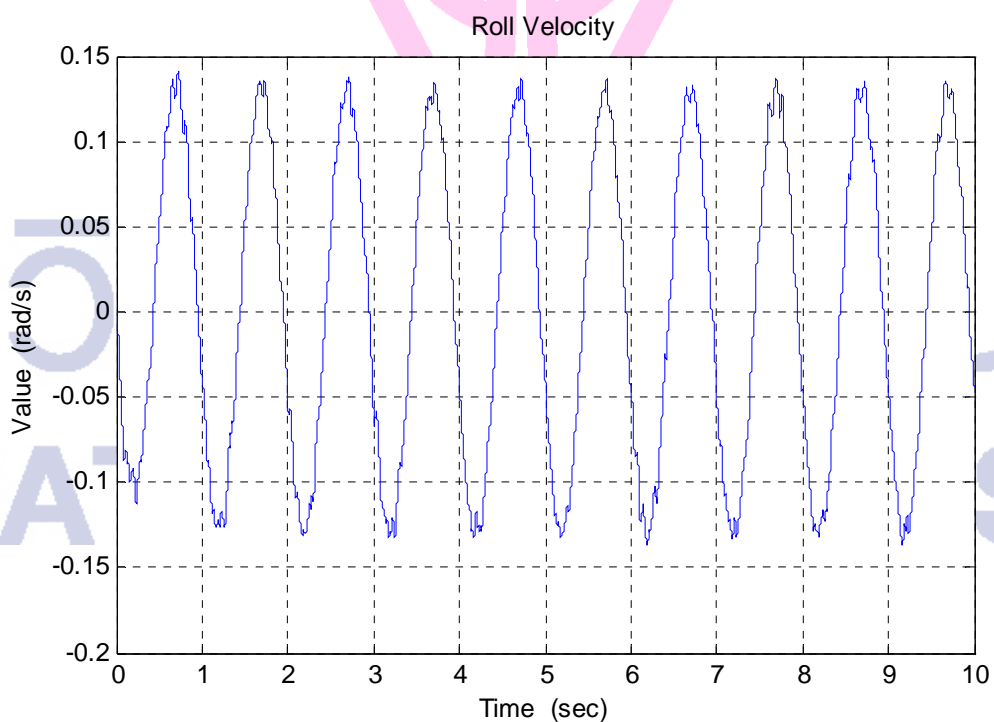
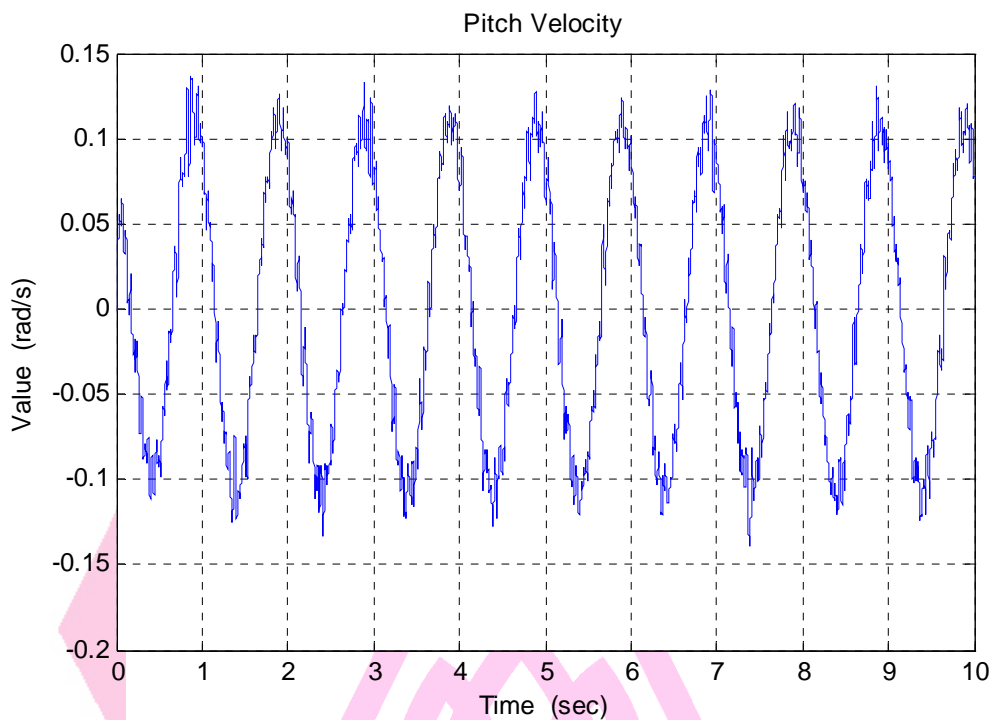
Mean = -0.0010798 rad, STD = 0.010323 rad, RMS = 0.010379 rad
Max = 0.014763 rad, Min = -0.020207 rad, Max-Min = 0.03497 rad

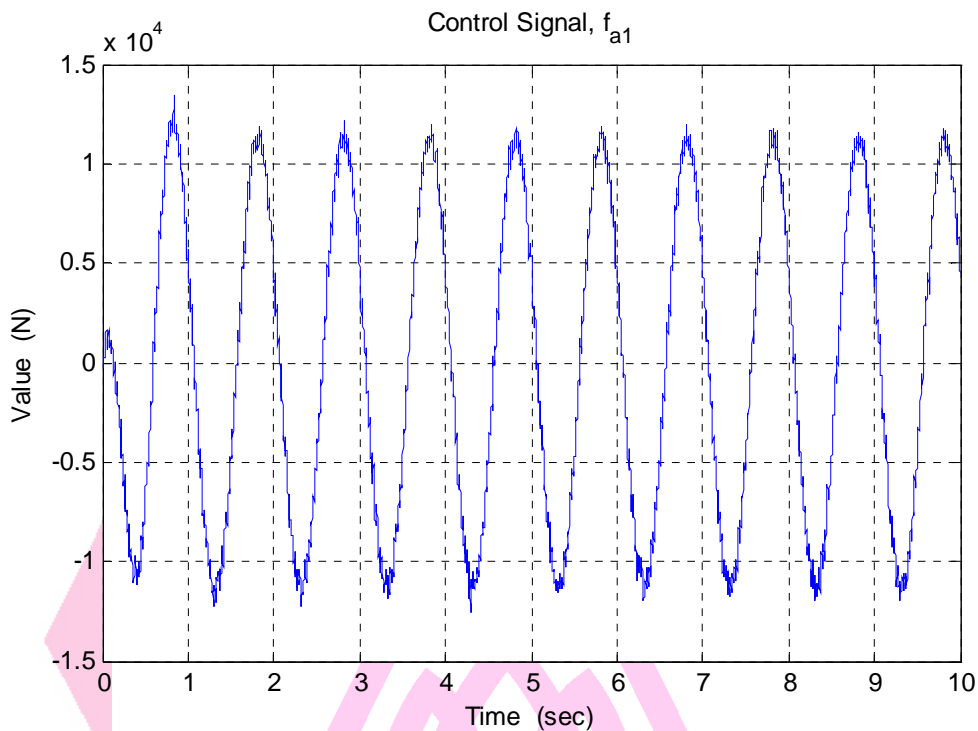


Mean = -0.0013846 rad, STD = 0.014256 rad, RMS = 0.014323 rad
Max = 0.019792 rad, Min = -0.027742 rad, Max-Min = 0.047534 rad

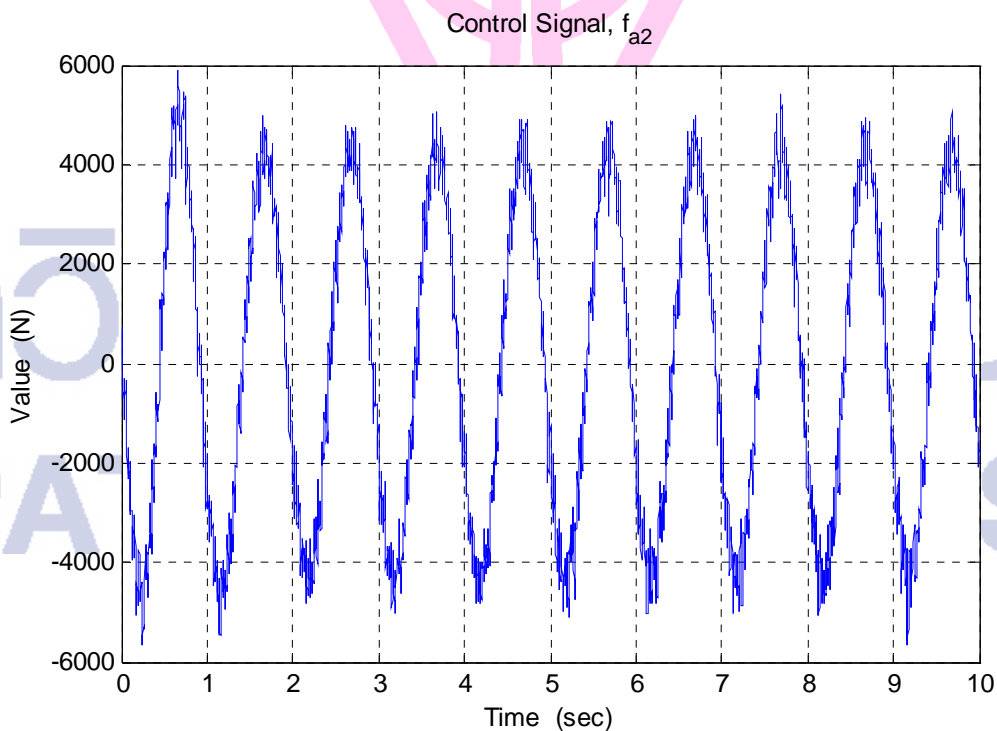


Mean = -0.00045716 m/s, STD = 0.078742 m/s, RMS = 0.078744 m/s
Max = 0.12685 m/s, Min = -0.13409 m/s, Max-Min = 0.26094 m/s

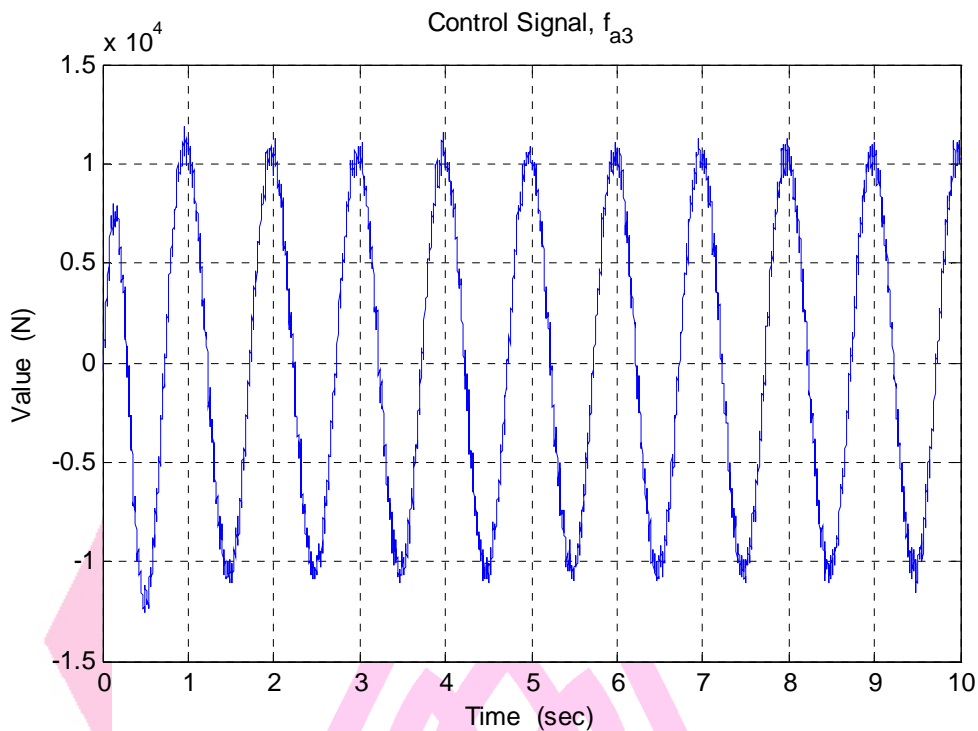




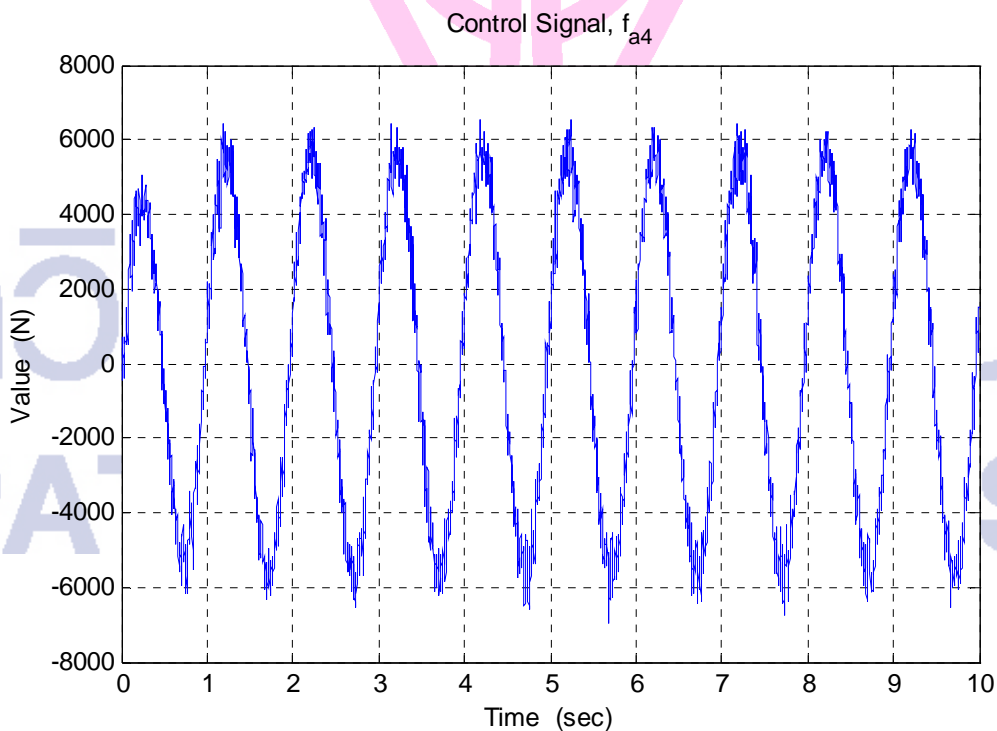
Mean = 59.453 N, STD = 7938.1434 N, RMS = 7938.3661 N
Max = 13504.1112 N, Min = -12604.9431 N, Max-Min = 26109.0543 N



Mean = 14.1455 N, STD = 3104.3433 N, RMS = 3104.3755 N
Max = 5881.0088 N, Min = -5667.1384 N, Max-Min = 11548.1471 N

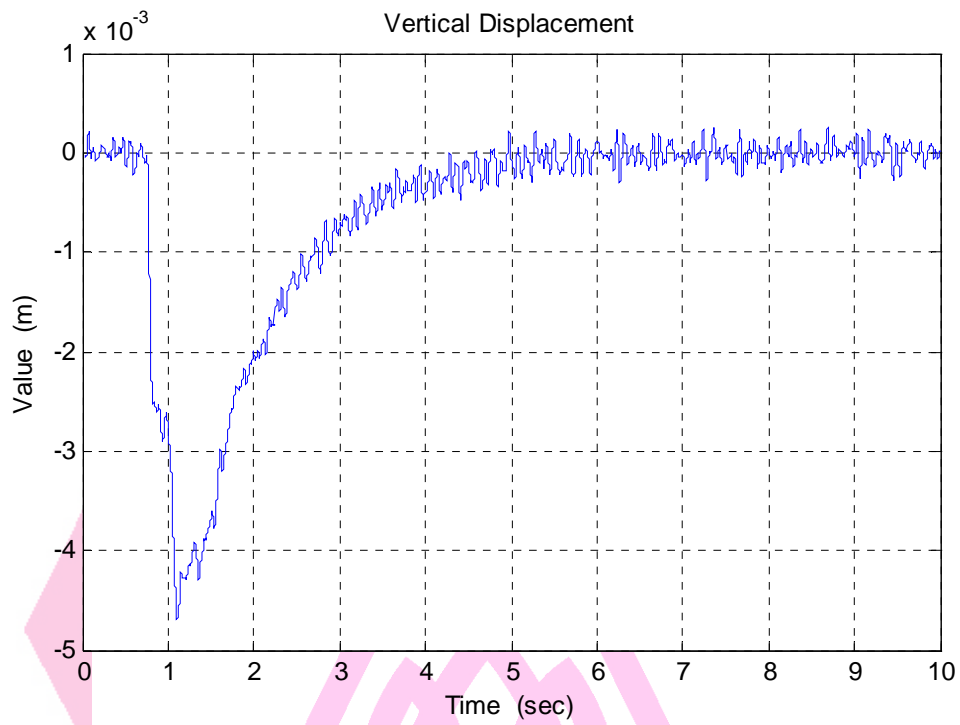


Mean = 0.97727 N, STD = 7417.769 N, RMS = 7417.769 N
Max = 11831.8516 N, Min = -12554.115 N, Max-Min = 24385.9666 N

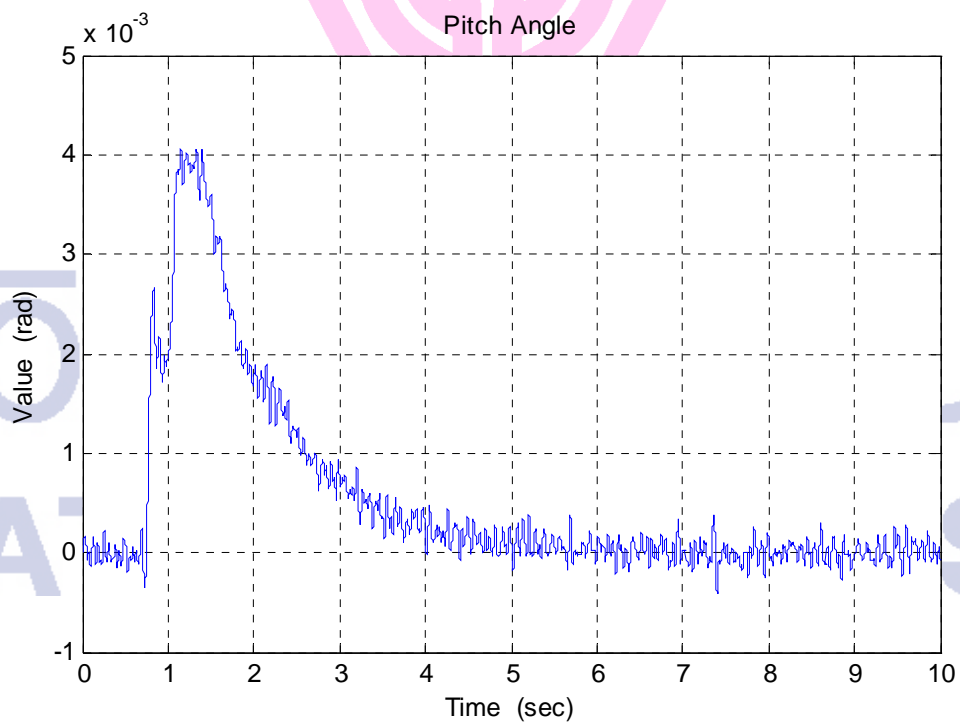


Mean = -39.6722 N, STD = 3949.9965 N, RMS = 3950.1957 N
Max = 6566.1706 N, Min = -6952.0234 N, Max-Min = 13518.1939 N

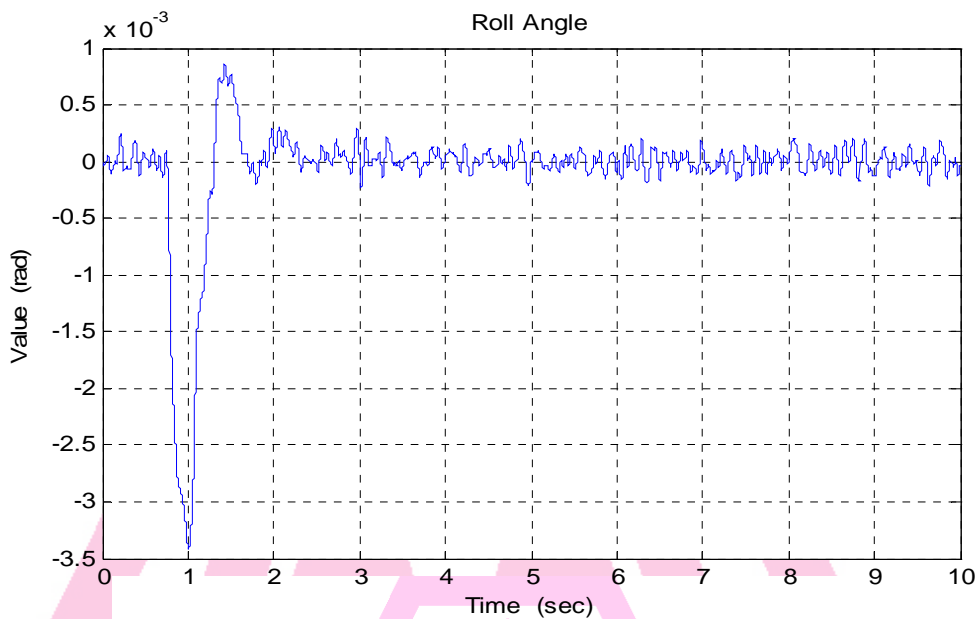
3.2 Impulse Profile



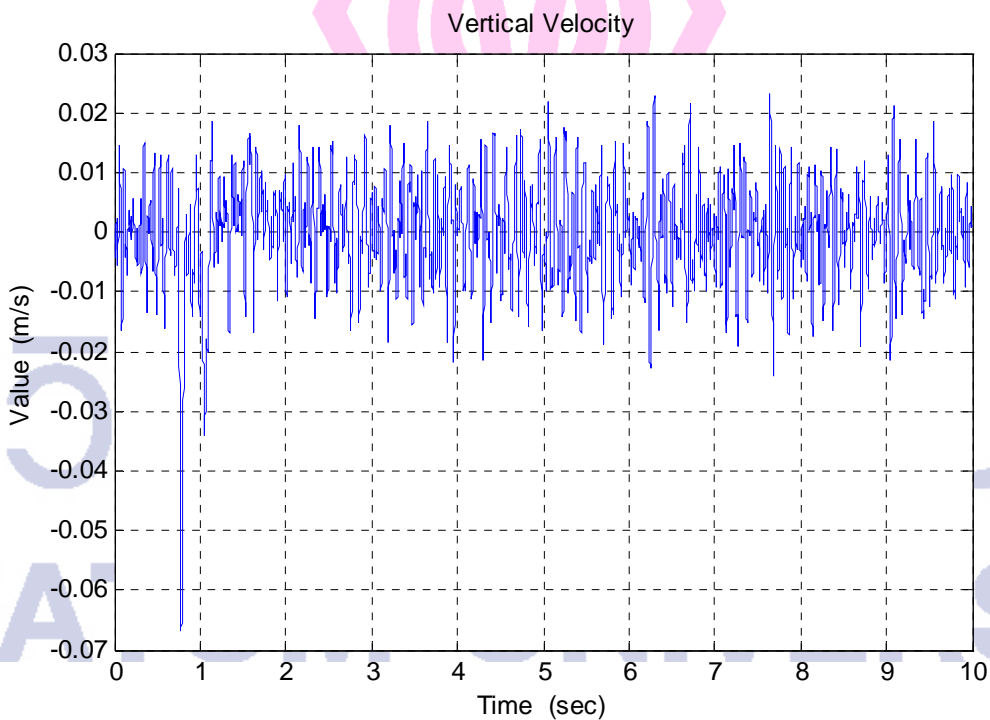
Mean = -0.00060337 m, STD = 0.0011019 m, RMS = 0.0012563 m
Max = 0.000261 m, Min = -0.0046981 m, Max-Min = 0.0049591 m



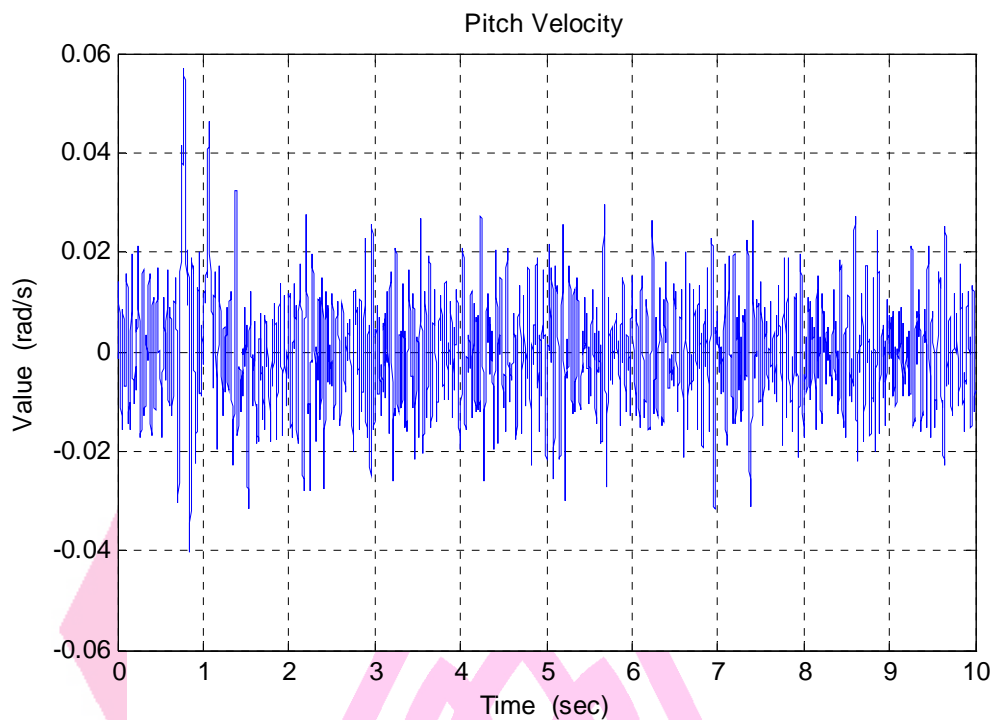
Mean = 0.0005362 rad, STD = 0.00098713 rad, RMS = 0.0011234 rad
Max = 0.0040596 rad, Min = -0.00040441 rad, Max-Min = 0.004464 rad



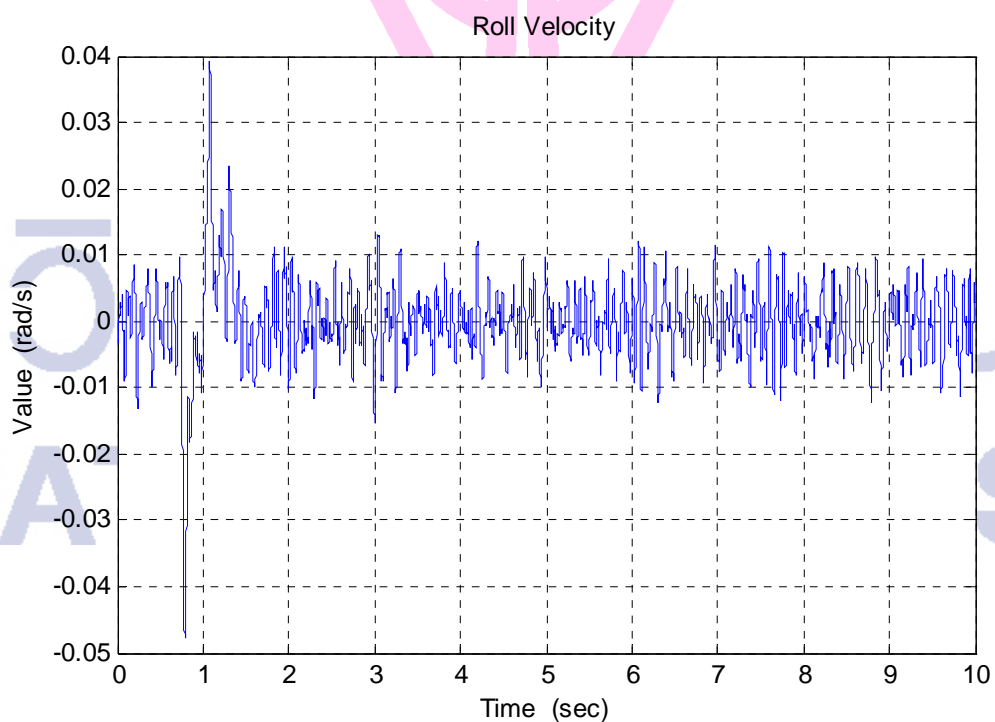
Mean = -6.8927×10^{-5} rad, STD = 0.00052242 rad, RMS = 0.00052695 rad
Max = 0.00086168 rad, Min = -0.0034204 rad, Max-Min = 0.0042821 rad



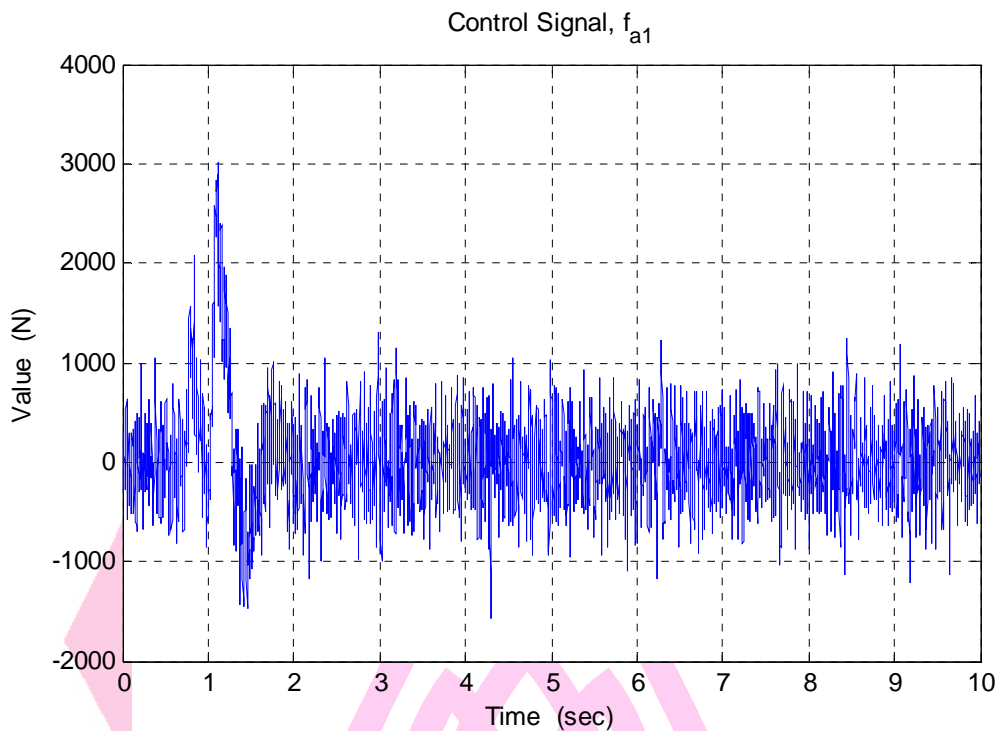
Mean = -3.7358×10^{-5} m/s, STD = 0.0085517 m/s, RMS = 0.0085518 m/s
Max = 0.023302 m/s, Min = -0.06685 m/s, Max-Min = 0.090151 m/s



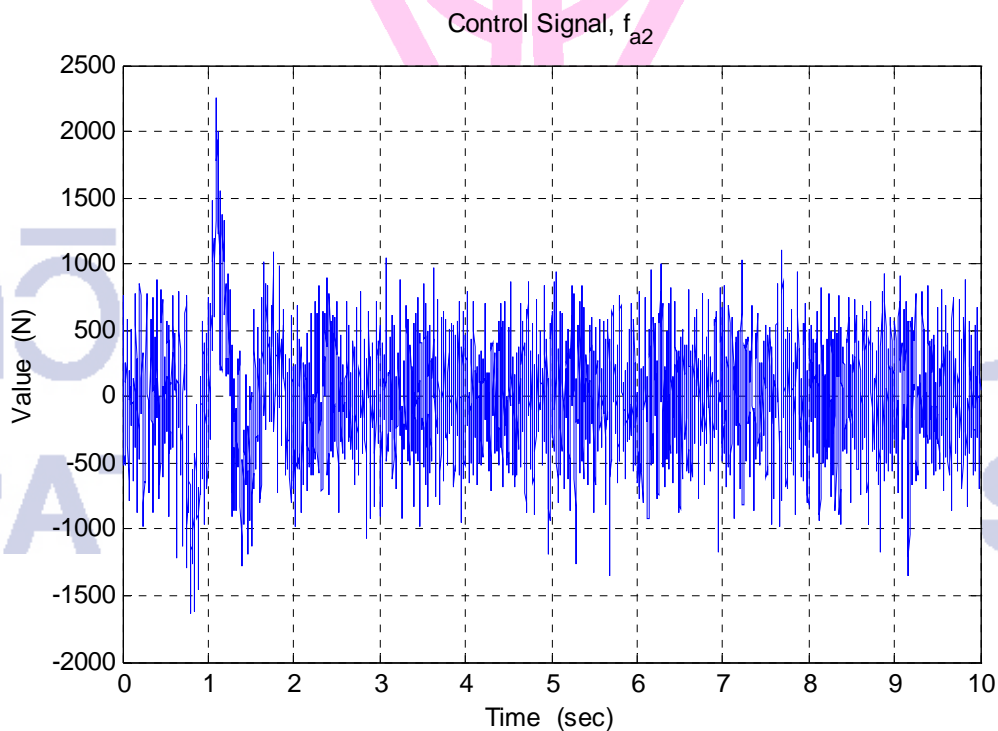
Mean = 5.8215×10^{-5} rad/s, STD = 0.010684 rad/s, RMS = 0.010684 rad/s
Max = 0.057148 rad/s, Min = -0.040465 rad/s, Max-Min = 0.097612 rad/s



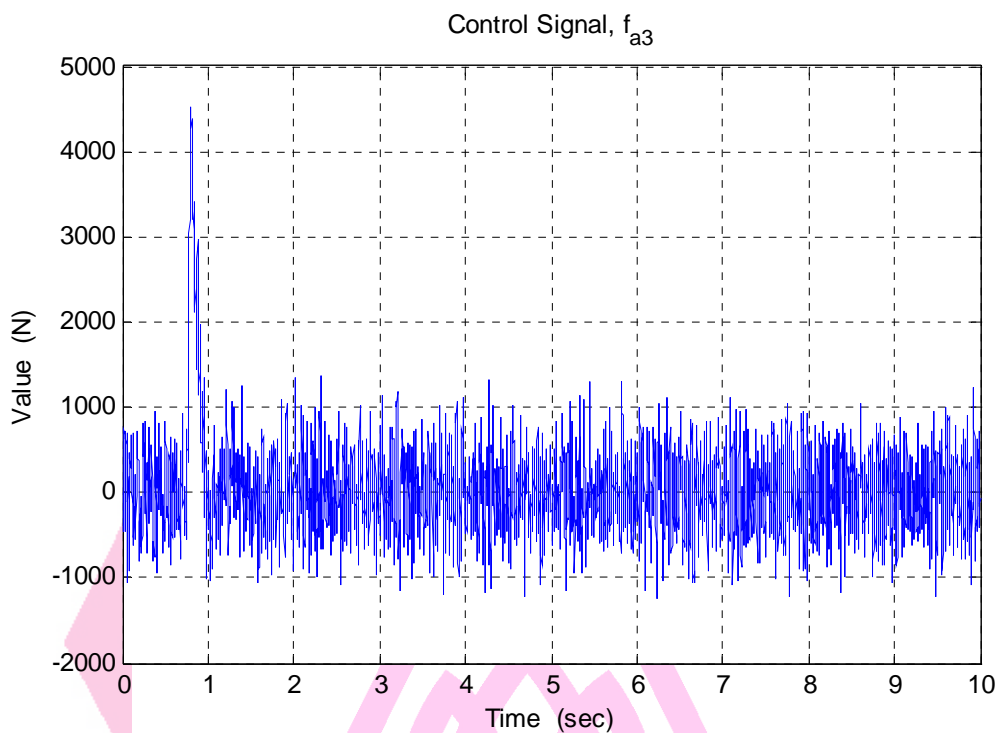
Mean = -3.5727×10^{-6} rad/s, STD = 0.0062098 rad/s, RMS = 0.0062098 rad/s
Max = 0.039192 rad/s, Min = -0.047715 rad/s, Max-Min = 0.086907 rad/s



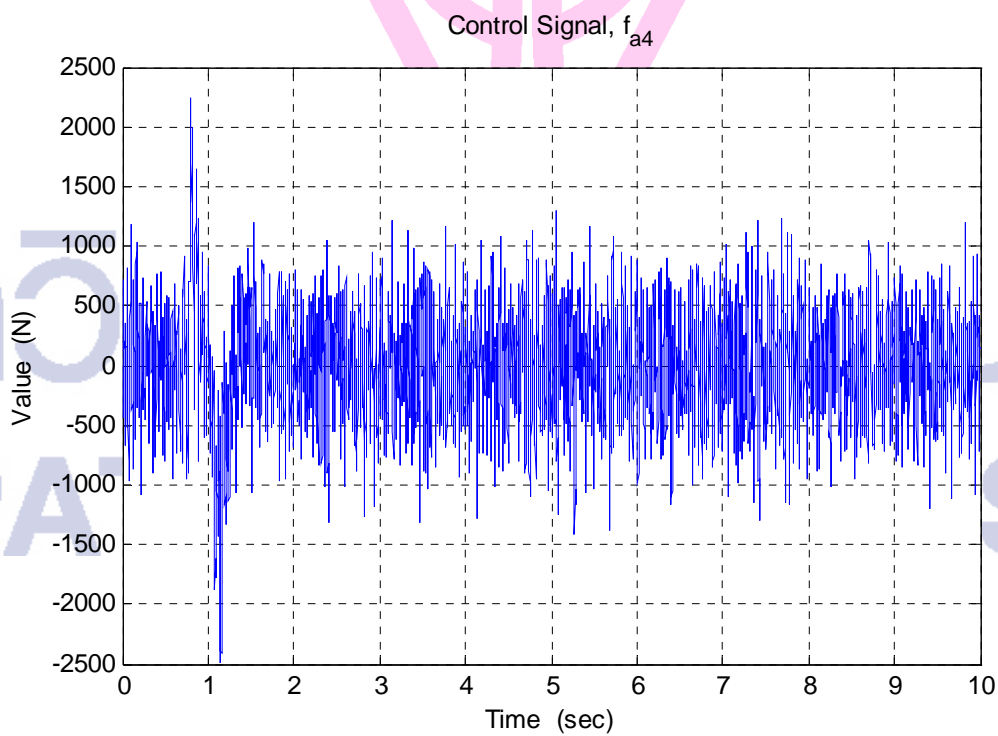
Mean = 36.3386 N, STD = 449.2233 N, RMS = 450.6906 N
Max = 3026.1065 N, Min = -1566.6399 N, Max-Min = 4592.7464 N



Mean = 2.2659 N, STD = 407.9999 N, RMS = 408.0062 N
Max = 2259.388 N, Min = -1629.1656 N, Max-Min = 3888.5536 N



Mean = 41.5454 N, STD = 523.3681 N, RMS = 525.0145 N
Max = 4520.2187 N, Min = -1255.9099 N, Max-Min = 5776.1286 N



Mean = -2.4002 N, STD = 436.4157 N, RMS = 436.4223 N
Max = 2244.1196 N, Min = -2491.599 N, Max-Min = 4735.7186 N



ภาคผนวก ข

โปรแกรมจำลองการทำงาน MATLAB

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

```

% *****
% * Active Suspension Simulation *
% * By *
% * Opart Gomonwattanapanich *
% * Adual Pattanapukdee *
% * Sripatum University *
% * www.spu.ac.th *
% *****

% Purpose of Simulation
% To get the positions of Car at CG
% Each wheel are independent in motion
% No controller

% -----
% 1. Simulation Time and Noise
% -----

clc
Ts = 0.001; % Sampling Time
Tfinal = 10; % Final Time
N = Tfinal/Ts; % Number of Time Step
t=0:Ts:Tfinal;

% Niose and Distirbance Generate
% v = measurement noise generate from Simulink
% V = [v1'; v2'; v3'];

% V = zeros(3,N+1); % No measurement noise

% -----
% 2. Road profile Input
% -----

Lfr = 2.73; % Front-Rear wheel base (BMW 318iA, 2001)
V_car = 10; % Car velocity

% Choss Road Profile 1 = Sin, 2 = Impulse, 3 = White Noise

```

```
Road_Profile = 2
```

```
switch Road_Profile
```

```
case 1,
```

```
% 2.1 Sinusoidal
```

```
Period = 10;
```

```
Amp_road = 0.1; % Amplitude
```

```
xr1 = Amp_road*sin(2*pi*V_car*t/Period); % Front Left
```

```
xr3 = Amp_road*sin(2*pi*(V_car*t-Lfr)/Period); %Real Left
```

```
% plot(t,xr1,t,xr3)
```

```
% axis([0 10 -0.5 0.5])
```

```
% grid
```

```
case 2,
```

```
% 2.2 Impulse
```

```
t_1 = 10/V_car; % Start at X = 10 m
```

```
n_1 = t_1/Ts
```

```
t_2 = 10.6/V_car; % End at X = 1.6 m
```

```
n_2 = t_2/Ts;
```

```
Del_n = Lfr/V_car/Ts; % Time Delay
```

```
x_local = -0.3:V_car*Ts:0.3;
```

```
y_local = sqrt(0.25-x_local.*x_local);
```

```
Del_y_local = (y_local -0.4);
```

```
x_global = V_car*t;
```

```
xr1 = zeros(1,N+1);
```

```
xr1(n_1:n_2)=-Del_y_local;
```

```
xr3 = zeros(1,N+1);
```

```
xr3(n_1-Del_n:n_2-Del_n)=-Del_y_local;
```

```
%plot(x_global,xr1,x_global,xr3)
```

```
%plot(t,xr1,t,xr3)
```

```
%axis([ 0 10 -0.5 1])
```

```
case 3,
```

```

% 2.3 White Noise

case 4,
    disp('>>>>----->> Choss Road Prbofile .....')
end
% Xr = zeros(4,N+1);
%   Xr(1,:)=xr1;
%   Xr(3,:)=xr3;

% -----
%       3. Vehicle Characteristics
% -----

% Constant
tf = 1.481; %Front track width - BMW 318iA
tr = 1.493; %Rear track width - BMW 318iA
lf = Lfr/2; %Front wheel base - BMW 318iA
lr = Lfr/2; %Rear wheel base - BMW 318iA

ms = 1011; %Car body mass
ms1 = 1/2*lr/(lf+lr)*ms;
ms3 = 1/2*lf/(lf+lr)*ms;

mu1 = 210; %Wheel mass
mu3 = 210;

ks1 = 10950; %Front stiffness
ks2 = 10950; %Front stiffness
ks3 = 14360; %Rear stiffness
ks4 = 14360; %Rear stiffness

kt = 190000; % tire stiffness

cs1 = 530; %Front damping
cs2 = 530; %Front damping

```



```

cs3 = 910; %Rear damping
cs4 = 910; %Rear damping

% -----
%      4. Simulation at each Wheel
% -----

% *****
% * Wheel #1 Front Left *
% *****

% (1) Continous Model for Car, See note
%  $\dot{X} = A_c X + B_c u + G_c X_r$ 
%  $X_r$  = Road profile
%  $y = C_c X$ 
%  $B_c = 0$  No control

Ac = [ 0      1      0      0;
      (-ks1-kt)/mu1  -cs1/mu1  ks1/mu1  cs1/mu1;
      0      0      0      1;
      ks1/ms1  cs1/ms1  -ks1/ms1  -cs1/ms1];

Gc = [0; kt/mu1; 0; 0];
Cc = [0 0 1 0];
%sys1 = ss(Ac,Gc,Cc,0);
%step(sys1);

% (2) Vehicle Discrete Model
%
% Discret Model for Car, http://en.wikipedia.org/wiki/Discretization
%  $X(k+1) = A_d X(k) + B_d u(k) + G_d X_r(k)$ 
%  $X_r = X_i + w$ ;  $X_i$  Road profile,  $w$  = process noise
%  $y(k) = C_d X(k) + v(k)$ 
% for Continous Model -->  $\dot{X} = AX + Bu + Gr$ 

```

```

% Discrete Model -->  $X(k+1) = (I+A^*T)X(k) + (I^*T + 0.5^*A^*T^2)B^*u(k) + (I^*T + 0.5^*A^*T^2)G^*r(k)$ 
% T = Sampling Time

Ad = eye(4)+ Ts*Ac;
Gd = (Ts*eye(4)+0.5*Ts*Ts*Ac)*Gc;
Cd = Cc;

% Test of model conversion
% t=0:Ts:10;
% Car_Model_c = ss(Ac,Gc,Cc,0);
% step(Car_Model_c,t)
% figure
% Car_Model_d = ss(Ad,Gd,Cd,0,Ts);
% step(Car_Model_d,t)
% step(Car_Model_d,Car_Model_c,t)

%Initial
Xp = zeros(4,1); % Plant State

disp('>>>>----->> Program is Running Wheel #1.....')
for k = 2:(N+1)
    Xp(:,k)=Ad*Xp(:,k-1)+ Gd*xr1(:,k-1); % Actual Plant State Update
end

disp('>>>>----->> Program End Wheel #1.....')
xs1=Xp(3,:); % ms1 Position
vs1 = Xp(4,:); % ms1 Velocity

% *****
% * Wheel #3 Rear Left *

```

```

% *****

% (1) Continous Model for Car, See note
% Xdot = Ac*X + Bc*u + Gc*Xr
% Xr = Road profile
% y = Cc*X
% Bc = 0 No control

Ac = [ 0 1 0 0;
      (-ks3-kt)/mu3 -cs3/mu3 ks3/mu3 cs3/mu3;
      0 0 0 1;
      ks3/ms3 cs3/ms3 -ks3/ms3 -cs3/ms3];

Gc = [0; kt/mu3; 0; 0];
Cc = [0 0 1 0];

%sys1 = ss(Ac,Gc,Cc,0);
%step(sys1);

% (2) Vehicle Discrete Model
%
% Discrtet Model for Car, http://en.wikipedia.org/wiki/Discretization
%  $X(k+1) = A_d*X(k) + B_d*u(k) + G_d*X_r(k)$ 
%  $X_r = X_i + w$ ;  $X_i$  Road profile,  $w$  = process noise
%  $y(k) = C_d*X(k) + v(k)$ 
% for Continous Model -->  $Xdot = AX + Bu + Gr$ 
% Discrete Model -->  $X(k+1) = (I+A*T)X(k) + (I*T + 0.5*A*T^2)B*u(k) + (I*T + 0.5*A*T^2)G*r(k)$ 
% T = Sampling Time

Ad = eye(4)+ Ts*Ac;
Gd = (Ts*eye(4)+0.5*Ts*Ts*Ac)*Gc;
Cd = Cc;

% Test of model conversion

```

```

% t=0:Ts:10;
% Car_Model_c = ss(Ac,Gc,Cc,0);
% step(Car_Model_c,t)
% figure
% Car_Model_d = ss(Ad,Gd,Cd,0,Ts);
% step(Car_Model_d,t)
% step(Car_Model_d,Car_Model_c,t)

%Initial
Xp = zeros(4,1); % Plant State

disp('>>>>>----->> Program is Running Wheel #3.....')

for k = 2:(N+1)

    Xp(:,k)=Ad*Xp(:,k-1)+ Gd*xr1(:,k-1); % Actual Plant State Update

end

disp('>>>>>----->> Program End Wheel #3.....')
xs3=Xp(3,:); % ms3 Position
vs3 = Xp(4,:); % ms3 Velocity
% Wheel #2 and #4 Right Wheels
% *****
% * Whee2 # Front Right *
% *****
xs2 = zeros(1,N+1);
vs2 = zeros(1,N+1);

% *****
% * Whee4 #3 Rear Right *
% *****

```

```

xs4 = zeros(1,N+1);
vs4 = zeros(1,N+1);

% -----
%      5. Calculate at Center of Car
% -----

% Front beam center
xf = 0.5*(xs1 + xs2);
vf = 0.5*(vs1 + vs2);
% Rear beam center
xr = 0.5*(xs3 + xs4);
vr = 0.5*(vs3 + vs4);
% Front beam angle
Phi_f = atan((xs2-xs1)/tf);
Phi_f_dot = (tf*(vs2-vs1))./(tf*tf + xs2.*xs2 - xs2.*xs1 + xs1.*xs1);
% Rear beam center
Phi_r = atan((xs4-xs3)/tr);
Phi_r_dot = (tr*(vs4-vs3))./(tr*tr + xs4.*xs4 - xs4.*xs3 + xs3.*xs3);
% Pitch Angle
Phi = lr/(lf+lr)*Phi_f + lf/(lf+lr)*Phi_r;% Pitch Angle Position
Phi_dot = lr/(lf+lr)*Phi_f_dot + lf/(lf+lr)*Phi_r_dot; % Pitch-Angle Rate
% Roll Angle
Theta = atan((xr-xf)/Lfr); % Roll Angle Position
Theta_dot = (Lfr*(vr-vf))./(Lfr*Lfr + xr.*xr - xr.*xf + xf.*xf); % Roll-Angle Rate
% Vertical Displacement
z = lr/(lf+lr)*xf + lf/(lf+lr)*xr; % Vertical Position
z_dot = lr/(lf+lr)*vf + lf/(lf+lr)*vr; % Vertical Velocity

% -----
%      6. Plot Graph
% -----

% (1) Plot Position

```

```

disp('position')
Mean1 = mean(z)
STD1 = std(z)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(z)
Min1 = min(z)
Max_Min = Max1 - Min1
figure
plot(t,z)
title('Vertical Displacement')
xlabel({'Time (sec)';['Mean = ', num2str(Mean1),' m, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' m, RMS = ',num2str(RMS1), ' m'];['Max = ', num2str(Max1),' m, Min = ', ...
    num2str(Min1), ' m, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' m']})
ylabel('Value (m)')
grid

Mean1 = mean(Phi)
STD1 = std(Phi)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Phi)
Min1 = min(Phi)
Max_Min = Max1 - Min1
figure
plot(t,Phi)
title('Pitch Angle')
xlabel({'Time (sec)';['Mean = ', num2str(Mean1),' rad, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' rad, RMS = ',num2str(RMS1), ' rad'];['Max = ', num2str(Max1),' rad, Min = ', ...
    num2str(Min1), ' rad, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' rad']})
ylabel('Value (rad)')
grid

Mean1 = mean(Theta)
STD1 = std(Theta)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)

```

```

Max1 = max(Theta)
Min1 = min(Theta)
Max_Min = Max1 - Min1

figure
plot(t,Theta)
title('Roll Angle')
xlabel(['Time (sec)';[Mean = ', num2str(Mean1),' rad, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' rad, RMS = ',num2str(RMS1), ' rad'];['Max = ', num2str(Max1),' rad, Min = ', ...
    num2str(Min1), ' rad, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' rad']})
ylabel('Value (rad)')
grid

% (2) Plot Velocity
disp('velocity')
Mean1 = mean(z_dot)
STD1 = std(z_dot)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(z_dot)
Min1 = min(z_dot)
Max_Min = Max1 - Min1

figure
plot(t,z_dot)
title('Vertical Velocity')
xlabel(['Time (sec)';[Mean = ', num2str(Mean1),' m/s, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' m/s, RMS = ',num2str(RMS1), ' m/s'];['Max = ', num2str(Max1),' m/s, Min = ', ...
    num2str(Min1), ' m/s, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' m/s']})
ylabel('Value (m/s)')
grid

Mean1 = mean(Phi_dot)
STD1 = std(Phi_dot)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Phi_dot)
Min1 = min(Phi_dot)

```

```

Max_Min = Max1 - Min1

figure

plot(t,Phi_dot)

title('Pitch Velocity')

xlabel(['Time (sec)';[Mean = ', num2str(Mean1),' rad/s, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' rad/s, RMS = ',num2str(RMS1), ' rad/s'];['Max = ', num2str(Max1),' rad/s, Min =
', ...
    num2str(Min1), ' rad/s, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' rad/s']])

ylabel('Value (rad/s)')

grid

Mean1 = mean(Theta_dot)
STD1 = std(Theta_dot)
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Theta_dot)
Min1 = min(Theta_dot)
Max_Min = Max1 - Min1

figure

plot(t,Theta_dot)

title('Roll Velocity')

xlabel(['Time (sec)';[Mean = ', num2str(Mean1),' rad/s, STD = ', ...
    num2str(STD1), ' rad/s, RMS = ',num2str(RMS1), ' rad/s'];['Max = ', num2str(Max1),' rad/s, Min =
', ...
    num2str(Min1), ' rad/s, Max-Min = ',num2str(Max_Min), ' rad/s']])

ylabel('Value (rad/s)')

grid

```



```

% *****
% *      LQG Controller      *
% * Active Suspension Simulation *
% *      By      *
% * Opart Gomonwattanapanich *
% * Adual Pattanapukdee *
% * Sripatum University *
% * www.spu.ac.th *
% *****

% -----
% 1. Simulation Time and Noise
% -----

clc

Ts = 0.001; % Sampling Time
Tfinal = 10; % Final Time
N = Tfinal/Ts; % Number of Time Step
t=0:Ts:Tfinal;
% Niose and Distirbance Generate
% v = measurement noise generate from Simulink

V = [v1'; v2'; v3'];
%V = zeros(3,N+1); % No measurement noise

% -----
% 2. Road profile Input
% -----

Lfr = 2.73; % Front-Rear wheel base (BMW 318iA, 2001)
V_car = 10; % Car velocity

% Choss Road Profile 1 = Sin, 2 = Impules,3 = White Noise

```

```
Road_Profile = 2
```

```
switch Road_Profile
```

```
case 1,
```

```
% 2.1 Sinusoidal
```

```
Period = 10;
```

```
Amp_road = 0.1; % Amplitude
```

```
xr1 = Amp_road*sin(2*pi*V_car*t/Period); % Front Left
```

```
xr3 = Amp_road*sin(2*pi*(V_car*t-Lfr)/Period); %Real Left
```

```
% plot(t,xr1,t,xr3)
```

```
% axis([0 10 -0.5 0.5])
```

```
% grid
```

```
case 2,
```

```
% 2.2 Impulse
```

```
t_1 = 10/V_car; % Start at X = 10 m
```

```
n_1 = t_1/Ts
```

```
t_2 = 10.6/V_car; % End at X = 1.6 m
```

```
n_2 = t_2/Ts;
```

```
Del_n = Lfr/V_car/Ts; % Time Delay
```

```
x_local = -0.3:V_car*Ts:0.3;
```

```
y_local = sqrt(0.25-x_local.*x_local);
```

```
Del_y_local = (y_local -0.4);
```

```
x_global = V_car*t;
```

```
xr1 = zeros(1,N+1);
```

```
xr1(n_1:n_2)=-Del_y_local;
```

```
xr3 = zeros(1,N+1);
```

```
xr3(n_1-Del_n:n_2-Del_n)=-Del_y_local;
```

```
%plot(x_global,xr1,x_global,xr3)
```

```
%plot(t,xr1,t,xr3)
```

```
%axis([ 0 10 -0.5 1])
```

```
case 3,
```

```

% 2.3 White Noise

case 4,
    disp('>>>>----->> Choss Road Prbofile .....')
end

Xr = zeros(4,N+1);
Xr(1,:)=xr1;
Xr(3,:)=xr3;

% -----
%      3. Vehicle Continuous Model
% -----

% Constant
tf = 1.481; %Front track width - BMW 318iA
tr = 1.493; %Rear track width - BMW 318iA
lf = Lfr/2; %Front wheel base - BMW 318iA
lr = Lfr/2; %Rear wheel base - BMW 318iA
R=[1 1 1 1; -tf/2 tf/2 -tr/2 tr/2; -lf -lf lr lr];
ms = 1011; %Car body mass

Ix =440; % Roll moment og inertia
Iy =2340; % Pitch moment og inertia
Ms = [ms 0 0; 0 Ix 0; 0 0 Iy];
mu1 = 210 ; %Wheel mass
Mu = mu1*eye(4);
ks1 = 10950; %Front stiffness

ks2 = 10950; %Front stiffness
ks3 = 14360; %Rear stiffness
ks4 = 14360; %Rear stiffness

Ks = [ks1 0 0 0; 0 ks2 0 0; 0 0 ks3 0; 0 0 0 ks4];

kt = 190000; % tire stiffness
Kt = kt*eye(4);

cs1 = 530; %Front damping
cs2 = 530; %Front damping
cs3 = 910; %Rear damping

```

```

cs4 = 910; %Rear damping
Cs = [cs1 0 0 0; 0 cs2 0 0; 0 0 cs3 0; 0 0 0 cs4];

Ms_inv = inv(Ms);
Mu_inv = inv(Mu);
-Ms_inv*R*Ks*R';
Mu_inv*Ks*R';

% Continuous Model for Car, H.J.Kim
% Xdot = Ac*X + Bc*u + Gc*Xr
% Xr = Xi + w; Xi Road profile, w = process noise
% y = Cc*X + v
Ac = zeros(14);
Ac(1:3,4:6)=eye(3);
Ac(4:6,1:3)=-Ms_inv*R*Ks*R';
Ac(4:6,4:6)=-Ms_inv*R*Cs*R';
Ac(4:6,7:10)=Ms_inv*R*Ks;
Ac(4:6,11:14)=Ms_inv*R*Cs;
Ac(7:10,11:14)=eye(4);
Ac(11:14,1:3)=Mu_inv*Ks*R';
Ac(11:14,4:6)=Mu_inv*Cs*R';
Ac(11:14,7:10)=-Mu_inv*Ks;
Ac(11:14,11:14)=-Mu_inv*Cs;

Bc = zeros(14,4);
Bc(4:6,:)=Ms_inv*R;
Bc(11:14,:)=Mu_inv;

Gc=zeros(14,4);
Gc(11:14,:)=Mu_inv*Kt;

Cc=zeros(3,14);
Cc(1:3,1:3)=eye(3); % Output for Car body position: z, phi, zeta
%Cc=zeros(1,14); % For Test

```

```

%Cc(1,1)=eye(1); % For Test

% -----
%      4. Vehicle Discrete Model
% -----
% Discret Model for Car, http://en.wikipedia.org/wiki/Discretization
%  $X(k+1) = A_d X(k) + B_d u(k) + G_d X_r(k)$ 
%  $X_r = X_i + w$ ;  $X_i$  Road profile,  $w$  = process noise
%  $y(k) = C_d X(k) + v(k)$ 
% for Continuous Model -->  $\dot{X} = AX + Bu + Gr$ 
% Discrete Model -->  $X(k+1) = (I+A^*T)X(k) + (I^*T + 0.5^*A^*T^2)B^*u(k) + (I^*T + 0.5^*A^*T^2)G^*r(k)$ 
% T = Sampling Time

Ad = eye(14)+ Ts*Ac;
Bd = (Ts*eye(14)+0.5*Ts*Ts*Ac)*Bc;
Gd = (Ts*eye(14)+0.5*Ts*Ts*Ac)*Gc;
Cd = Cc;

% Test of model conversion
% t=0:Ts:10;
% Car_Model_c = ss(Ac,Bc,Cc,0);
% step(Car_Model_c,t)
% figure
% Car_Model_d = ss(Ad,Bd,Cd,0,Ts);
% step(Car_Model_d,t)
% step(Car_Model_d,Car_Model_c,t)

% -----
%      5. LQG Controller Design
% -----

% 5.1 Design Kalman Gain

```

```

%Sv = 0.0447; Sv2 = Sv*Sv; % Noise Characteristics
Q_kf = 1e4*eye(4);
R_kf = 0.1*eye(3);
sys_kf=ss(Ad,[Bd Gd],Cd,0,Ts);
[kest,K_kf,P_kf]=kalman(sys_kf,Q_kf,R_kf,0); %K_kf size = 14x3

% 5.2 Design LQR Gain
Q_lqr = 1*eye(14);
Q_lqr(1:3,1:3)=1e4*eye(3); % Minimize Poition
Q_lqr(4:6,4:6)=1e4*eye(3); % Minimize velocity
R_lqr=1e-5*eye(4);

[K_lqr,S_lqr,e_lqr]=dlqr(Ad,Bd,Q_lqr,R_lqr); % K_lqr size = 4x14
K_lqr;

% -----
%      6. Simulation with LQG
% -----

%Initial
Xp = zeros(14,1); % Plant State
Xe = zeros(14,1); % Estimate State
Yp = Cd*Xp;      % Plant Output
Z = Yp + V(:,1); % Measurement Signal
U = zeros(4,1); % Control Signal

disp('>>>>>----->> Program is Running .....!')

for k = 2:(N+1)

    Xp(:,k)=Ad*Xp(:,k-1)+Bd*U(:,k-1) + Gd*Xr(:,k-1); % Actual Plant State Update
    Xe(:,k)=Ad*Xe(:,k-1)+Bd*U(:,k-1)+ K_kf*(Z(:,k-1)-Cd*Xe(:,k-1)); % Estimate State Update

```

```

Yp(:,k)= Cd*Xp(:,k);    % Plant output: Use in next step
Z(:,k) = Yp(:,k)+ V(:,k); % Measurement signal: Use in next step
U(:,k) = -K_lqr*Xe(:,k); % Control signal: Use in next step
end
disp('>>>>----->> Program End .....')
```

```

% -----
%      7. Result calculation
% -----
```

```
% 1. Polt Combine Graph
```

```
% figure
```

```
% plot(t,Yp)
```

```
% title('Position')
```

```
% legend('Vertical','Pitch','Roll')
```

```
% xlabel('Time (sec)')
```

```
% ylabel('Value (m, rad, rad)')
```

```
% grid
```

```
% gtext('R_l_q_r = 1e-5')
```

```
%
```

```
%
```

```
% figure
```

```
% plot(t,Xp(4:6,:))
```

```
% title('Velocity')
```

```
% legend('Vertical','Pitch','Roll')
```

```
% xlabel('Time (sec)')
```

```
% ylabel('Value (m/s, rad/s, rad/s)')
```

```
% grid
```

```
% gtext('R_l_q_r = 1e-5')
```

```
% 2. Plot Each Graph
```

```
% 2.1 Plot Position
```

```
disp('position')
```

```
Mean1 = mean(Yp(1,:))
```

```
STD1 = std(Yp(1,:))
```

```

RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Yp(1,:))
Min1 = min(Yp(1,:))
Max_Min = Max1 - Min1

figure
plot(t,Yp(1,:))
title('Vertical Displacement')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' m, STD = ', ...
       num2str(STD1), ' m, RMS = ', num2str(RMS1), ' m'; ['Max = ', num2str(Max1), ' m, Min = ', ...
       num2str(Min1), ' m, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' m']])
ylabel('Value (m)')
grid

Mean1 = mean(Yp(2,:))
STD1 = std(Yp(2,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Yp(2,:))
Min1 = min(Yp(2,:))
Max_Min = Max1 - Min1

figure
plot(t,Yp(2,:))
title('Pitch Angle')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' rad, STD = ', ...
       num2str(STD1), ' rad, RMS = ', num2str(RMS1), ' rad'; ['Max = ', num2str(Max1), ' rad, Min = ', ...
       num2str(Min1), ' rad, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' rad']])
ylabel('Value (rad)')
grid

Mean1 = mean(Yp(3,:))
STD1 = std(Yp(3,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Yp(3,:))
Min1 = min(Yp(3,:))
Max_Min = Max1 - Min1

```



```

figure
plot(t,Yp(3,:))
title('Roll Angle')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' rad, STD = ', ...
      num2str(STD1), ' rad, RMS = ', num2str(RMS1), ' rad'; ['Max = ', num2str(Max1), ' rad, Min = ', ...
      num2str(Min1), ' rad, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' rad']])
ylabel('Value (rad)')
grid

% 2.2 Plot Velocity
disp('velocity')
Mean1 = mean(Xp(4,:))
STD1 = std(Xp(4,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Xp(4,:))
Min1 = min(Xp(4,:))
Max_Min = Max1 - Min1
figure
plot(t,Xp(4,:))
title('Vertical Velocity')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' m/s, STD = ', ...
      num2str(STD1), ' m/s, RMS = ', num2str(RMS1), ' m/s'; ['Max = ', num2str(Max1), ' m/s, Min = ', ...
      num2str(Min1), ' m/s, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' m/s']])
ylabel('Value (m/s)')
grid

Mean1 = mean(Xp(5,:))
STD1 = std(Xp(5,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Xp(5,:))
Min1 = min(Xp(5,:))
Max_Min = Max1 - Min1
figure
plot(t,Xp(5,:))

```

```

title('Pitch Velocity')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' rad/s, STD = ', ...
      num2str(STD1), ' rad/s, RMS = ', num2str(RMS1), ' rad/s'; ['Max = ', num2str(Max1), ' rad/s, Min = ', ...
      num2str(Min1), ' rad/s, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' rad/s']])
ylabel('Value (rad/s)')
grid

Mean1 = mean(Xp(6,:))
STD1 = std(Xp(6,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(Xp(6,:))
Min1 = min(Xp(6,:))
Max_Min = Max1 - Min1
figure
plot(t,Xp(6,:))
title('Roll Velocity')
xlabel(['Time (sec)'; num2str(Mean1), ' rad/s, STD = ', ...
      num2str(STD1), ' rad/s, RMS = ', num2str(RMS1), ' rad/s'; ['Max = ', num2str(Max1), ' rad/s, Min = ', ...
      num2str(Min1), ' rad/s, Max-Min = ', num2str(Max_Min), ' rad/s']])
ylabel('Value (rad/s)')
grid

```

% 2.3 Plot Control Signal

```

disp('control signal')
Mean1 = mean(U(1,:))
STD1 = std(U(1,:))
RMS1 = sqrt(Mean1^2 + STD1^2)
Max1 = max(U(1,:))
Min1 = min(U(1,:))
Max_Min = Max1 - Min1
figure

```




ภาคผนวก ค

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

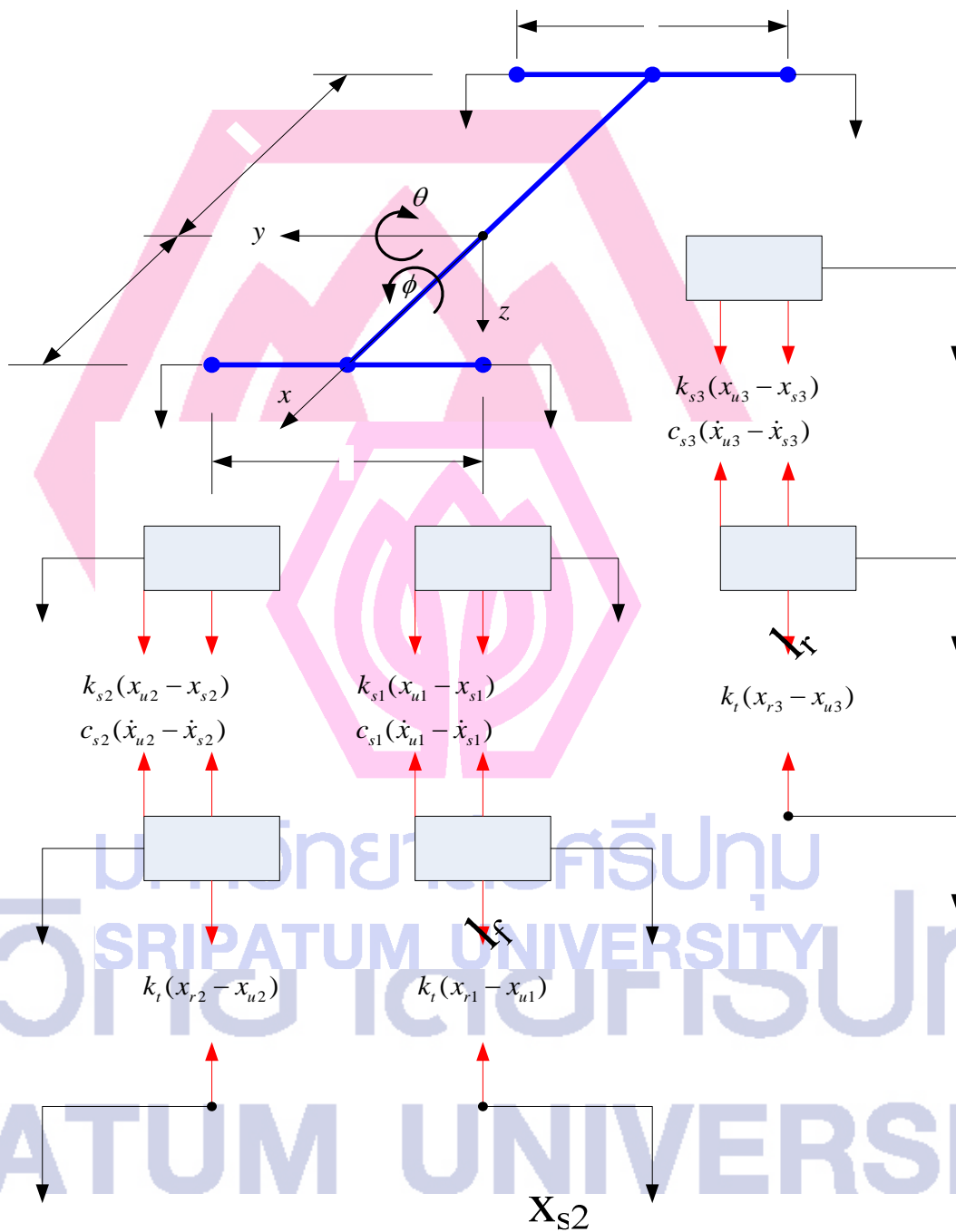
มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

Math Model for Independent Wheel Simulation



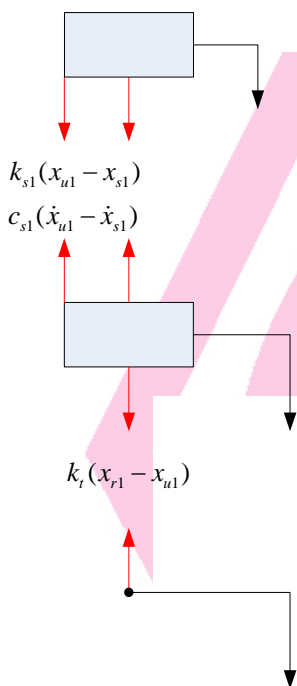
t_f

m_{s2}

X_{s2}

at Wheel 1: Using Newton's Second Law

$$\begin{aligned} m_{u1} \ddot{x}_{u1} &= -k_{s1}(x_{u1} - x_{s1}) - c_{s1}(\dot{x}_{u1} - \dot{x}_{s1}) + k_t(x_{r1} - x_{u1}) \\ m_{u1} \ddot{x}_{u1} &= -k_{s1}x_{u1} + k_{s1}x_{s1} - c_{s1}\dot{x}_{u1} + c_{s1}\dot{x}_{s1} + k_t x_{r1} - k_t x_{u1} \\ m_{u1} \ddot{x}_{u1} + k_{s1}x_{u1} - k_{s1}x_{s1} + c_{s1}\dot{x}_{u1} - c_{s1}\dot{x}_{s1} - k_t x_{r1} - k_t x_{u1} &= 0 \\ m_{u1} \ddot{x}_{u1} + c_{s1}\dot{x}_{u1} + k_{s1}x_{u1} + k_t x_{u1} - k_{s1}x_{s1} - c_{s1}\dot{x}_{s1} - k_t x_{r1} &= 0 \end{aligned}$$



at mass M_{s1}

$$\begin{aligned} m_{s1} \ddot{x}_{s1} &= k_{s1}(x_{u1} - x_{s1}) + c_{s1}(\dot{x}_{u1} - \dot{x}_{s1}) \\ m_{s1} \ddot{x}_{s1} &= k_{s1}x_{u1} - k_{s1}x_{s1} + c_{s1}\dot{x}_{u1} - c_{s1}\dot{x}_{s1} \\ m_{s1} \ddot{x}_{s1} - k_{s1}x_{u1} + k_{s1}x_{s1} - c_{s1}\dot{x}_{u1} + c_{s1}\dot{x}_{s1} &= 0 \end{aligned}$$

Let

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{u1} \\ x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{x}_{u1} \\ x_3 &= x_{s1} \\ x_4 &= \dot{x}_3 = \dot{x}_{s1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{u1} \ddot{x}_{u1} + c_{s1}\dot{x}_{u1} + k_{s1}x_{u1} + k_t x_{u1} - k_{s1}x_{s1} - c_{s1}\dot{x}_{s1} - k_t x_{r1} &= 0 \\ m_{u1} \dot{x}_2 + c_{s1}x_2 + k_{s1}x_1 + k_t x_1 - k_{s1}x_3 - c_{s1}x_4 - k_t x_{r1} &= 0 \\ m_{u1} \dot{x}_2 &= -c_{s1}x_2 - k_{s1}x_1 - k_t x_1 + k_{s1}x_3 + c_{s1}x_4 + k_t x_{r1} \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m_{u1}}(-c_{s1}x_2 - k_{s1}x_1 - k_t x_1 + k_{s1}x_3 + c_{s1}x_4 + k_t x_{r1}) \end{aligned}$$

\mathbf{X}_{s1}

$$\begin{aligned} m_{s1} \ddot{x}_{s1} - k_{s1}x_{u1} + k_{s1}x_{s1} - c_{s1}\dot{x}_{u1} + c_{s1}\dot{x}_{s1} &= 0 \\ m_{s1} \dot{x}_4 - k_{s1}x_1 + k_{s1}x_3 - c_{s1}x_2 + c_{s1}x_4 &= 0 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m_{s1}}(k_{s1}x_1 - k_{s1}x_3 + c_{s1}x_2 - c_{s1}x_4) \end{aligned}$$

\vdots

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m_{u1}}(-c_{s1}x_2 - k_{s1}x_1 - k_t x_1 + k_{s1}x_3 + c_{s1}x_4 + k_t x_{r1}) \end{aligned}$$

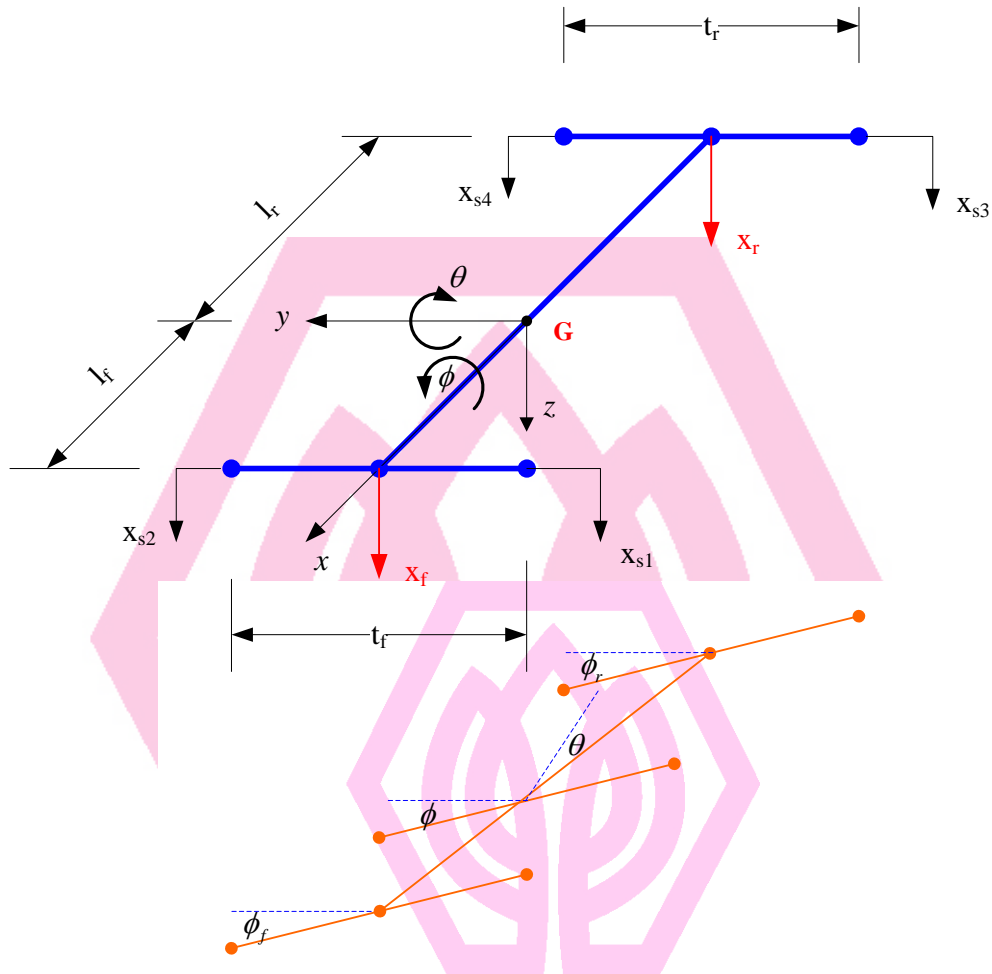
$\dot{x}_3 = x_4$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_{s1}}(k_{s1}x_1 - k_{s1}x_3 + c_{s1}x_2 - c_{s1}x_4)$$

Write in matrix

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_{s1} - k_t}{m_{u1}} & \frac{-c_{s1}}{m_{u1}} & \frac{k_{s1}}{m_{u1}} & \frac{c_{s1}}{m_{u1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_{s1}}{m_{s1}} & \frac{c_{s1}}{m_{s1}} & \frac{-k_{s1}}{m_{s1}} & \frac{-c_{s1}}{m_{s1}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{x_{r1}}{m_{u1}}$$

$$y = x_{s1} = x_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix}$$



$$x_f = \frac{1}{2}(x_{s1} + x_{s2})$$

$$x_r = \frac{1}{2}(x_{s3} + x_{s4})$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{x_{s2} - x_{s1}}{t_f}\right)$$

$$\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{x_{s4} - x_{s3}}{t_r}\right)$$

$$\phi = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r}\right)\phi_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r}\right)\phi_r$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x_r - x_f}{l_f + l_r}\right)$$

$$z = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r}\right)x_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r}\right)x_r$$

$$M_{s1} = M_{s2} = \frac{1}{2}\left(\frac{l_r}{l_f + l_r}\right)M_s$$

$$M_{s3} = M_{s4} = \frac{1}{2}\left(\frac{l_f}{l_f + l_r}\right)M_s$$

$$x_f = \frac{1}{2}(x_{s1} + x_{s2})$$

$$\dot{x}_f = \frac{1}{2}(\dot{x}_{s1} + \dot{x}_{s2})$$

$$x_r = \frac{1}{2}(x_{s3} + x_{s4})$$

$$\dot{x}_r = \frac{1}{2}(\dot{x}_{s3} + \dot{x}_{s4})$$

$$\frac{d}{dx}(\tan^{-1} u) = \frac{1}{1+u^2} \frac{du}{dx}$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{x_{s2} - x_{s1}}{t_f} \right)$$

$$\dot{\phi}_f = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{s2} - x_{s1}}{t_f} \right)^2} \left(\frac{\dot{x}_{s2} - \dot{x}_{s1}}{t_f} \right)$$

$$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{x_{s4} - x_{s3}}{t_r} \right)$$

$$\dot{\phi}_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{s4} - x_{s3}}{t_r} \right)^2} \left(\frac{\dot{x}_{s4} - \dot{x}_{s3}}{t_r} \right)$$

$$\phi = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \right) \phi_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r} \right) \phi_r$$

$$\dot{\phi} = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \right) \dot{\phi}_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r} \right) \dot{\phi}_r$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_r - x_f}{l_f + l_r} \right)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_r - x_f}{l_f + l_r} \right)^2} \left(\frac{\dot{x}_r - \dot{x}_f}{l_f + l_r} \right)$$

$$z = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \right) x_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r} \right) x_r$$

$$\dot{z} = \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \right) \dot{x}_f + \left(\frac{l_f}{l_f + l_r} \right) \dot{x}_r$$

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นาย อดุลย์ พัฒนภักดี	
วัน เดือน ปีเกิด	21 มิถุนายน 2512	
สถานที่เกิด	อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัด นครศรีธรรมราช	
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	18/146 หมู่บ้านเมืองทรัพย์ธานี แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510	
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์	
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กทม 10900	61 ถ.
ประวัติการศึกษา	<p>พ.ศ. 2535 วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง</p> <p>พ.ศ. 2542 MS. (Control Systems) จาก West Virginia University Institute of Technology, USA</p>	

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

ชื่อ	นาย โอภาส โกมลวัฒนาพาณิชย์		
วัน เดือน ปีเกิด	19 กุมภาพันธ์ 2504		
สถานที่เกิด	อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี		
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	39/332 ถ.สุขาภิบาล5 แขวงคลองสามวาตะวันตก	เขตคลอง	
	สามวา กทม 10510		
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	รองคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์		
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม	61 ถ.	
	พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กทม 10900		
ประวัติการศึกษา			
พ.ศ. 2526	วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า	พระ	
	นครเหนือ		
พ.ศ. 2534	วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า	พระ	
	นครเหนือ		
พ.ศ. 2542	MS. (Control Systems) จาก West Virginia University Institute of Technology, USA		
พ.ศ. 2546	Ph.D. (Mechanical Engineering) จาก University of Texas at Arlington, USA		

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

SRIPATUM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY