

การวิเคราะห์ความปลอดภัยในการขับขี่รถยนต์นั่ง 4 ล้อ โดยใช้เทคนิคไดนามิกซิมูเลชัน

Driving Safety Analysis Using Dynamic Simulation Technique to a Four-Wheel Vehicle Model

คำนำ

ในสภาพความเป็นจริงไม่สามารถจะหาถนนที่มีผิวราบเรียบ ซึ่งจะไม่ทำให้รถยนต์เกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากผิวถนนได้เลย ทั้งนี้เพราะสภาพการขับขี่จริงบนถนน ผิวถนนมักมีสภาพเป็นหลุมเป็นบ่อ หรือมีสิ่งกีดขวางอยู่เสมอ รถยนต์จึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงภาวะการสั่นสะเทือนได้ แต่เราสามารถลดการสั่นสะเทือนให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะได้ ด้วยการติดตั้งระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่เชื่อมต่อตัวถังของรถยนต์เข้ากับล้อรถ อันจะทำให้เกิดความปลอดภัยและเกิดความสะดวกสบายในการขับขี่

ระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์ จัดเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการลดการสั่นสะเทือน ในขณะที่รถยนต์แล่นไปบนสภาพถนนที่ขรุขระ ล้อ อันประกอบด้วย คุมล้อและยาง จะรับแรงกระแทกซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของผิวถนน จากนั้นจะส่งผ่านแรงมายังระบบรองรับการสั่นสะเทือนและตัวรถยนต์ ตามลำดับ เมื่อมวลซึ่งถูกรองรับด้วยสปริงมีแรงมากกระทำ จะเกิดการเคลื่อนที่แบบสั่นและจะยังคงสั่นต่อไปจนกว่าพลังงานจะสลายไปด้วยแรงหน่วง (Damping Force) ซึ่งจะมาเอาชนะหรือสลายพลังงานจากการกระแทกให้หมดไป

การออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนในรถยนต์เริ่มพัฒนาจากการออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่สร้างจากแบบจำลองระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อเดี่ยว (Quarter Car Suspension Model) แบบจำลองระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อคู่ (Half Car Suspension Model) และแบบจำลองระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดเต็มคัน (Full Car Suspension Model) ตามลำดับ โดยวิศวกรได้นำหลักการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เข้ามาช่วยในขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับลักษณะการทำงานของรถยนต์จริงมากขึ้น ลดความสูญเสียในการผลิต ก่อนที่จะทำการผลิตจริงหรือเพื่อใช้

เป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนในการผลิต อันจะนำมาซึ่งรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงสุด

เนื่องจากในสภาพการใช้งานจริงนั้น ล้วนมีปัจจัยต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องกับหลายประการซึ่งจำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบ อาทิ ความต้องการในด้านรูปทรงและความสวยงาม ความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการขับขี่ ลักษณะการใช้ที่แตกต่างกัน รวมทั้งปัจจัยจากสภาพพื้นผิวถนน เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถยนต์แบบเต็มคัน (Full car model) ชนิดแพชชีฟ ซึ่งเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน อันประกอบด้วย สปริงและโช้คอัพเนื่องจากมีความน่าเชื่อถือและราคาไม่แพง รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัยในการขับขี่รถยนต์บนถนน โดยการวิจัยนี้ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันประกอบไปด้วย ตัวรถยนต์และล้อทั้ง 4

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถยนต์นั่ง แบบ 4 ล้อ
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัยในการขับขี่รถยนต์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบรองรับความสั่นสะเทือนในรถยนต์นั่ง 4 ล้อ อันจะก่อให้เกิดความปลอดภัยและความสะดวกสบายสูงสุดในการขับขี่

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะระบบรองรับความสั่นสะเทือนของรถยนต์นั่ง 4 ล้อเท่านั้น
2. ขอบเขตงานวิจัยในขั้นนี้ จำกัดอยู่ที่การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในด้านพลศาสตร์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสภาพจริงของแรงและ โมเมนต์ที่กระทำต่อตัวรถยนต์นั่ง 4 ล้อ

การตรวจเอกสาร

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ และปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัยในการขับขี่ โดยผู้วิจัยได้นำแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นแนวทางในการศึกษา และสร้างกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังนี้

1. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
2. หลักการสันสะเทือนของรถยนต์
3. ส่วนประกอบของระบบรองรับความสั่นสะเทือน
4. คุณสมบัติของระบบรองรับความสั่นสะเทือน
5. น้ำหนักที่ถูกรองรับและน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ
6. การสันสะเทือนของน้ำหนักที่ถูกรองรับ
7. การสันสะเทือนของน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ
8. ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่รถยนต์แล่นผ่านสันบนถนน
9. ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่รถยนต์แล่นผ่านแอ่งบนถนน
10. ปรากฏการณ์ที่เกิดจากรถกระเพื่อมขึ้นลง
11. ปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสันสะเทือน
12. สัญญาณการสันสะเทือน

13. หน่วยวัดสัญญาณการสั้นสะเทือน
14. ระดับชั้นความเร็ว
15. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
16. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

กฎพื้นฐานทางกลศาสตร์ก็คือ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน(Newton's law of Motion) โดยเซอร์ ไอแซค นิวตัน ได้กล่าวว่า

กฎข้อที่ 1 วัตถุจะคงสภาพการหยุดนิ่งหรือสภาพการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอต่อไป ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

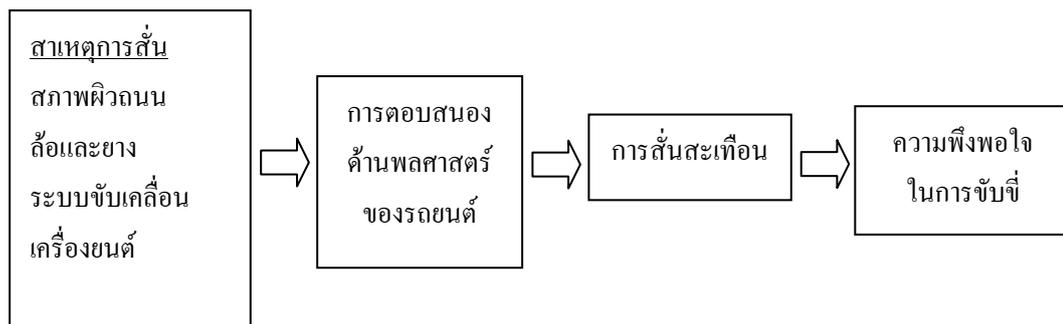
กฎข้อที่ 2 ความเร่งของวัตถุเป็นปฏิภาคโดยตรงกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ และมีทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์นั้น

กฎข้อที่ 3 เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุ จะมีแรงปฏิกิริยาขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้ามในแนวเส้นตรงเดียวกัน กระทำต่อจากวัตถุเสมอ

ซึ่งกฎข้อที่ 2 ของนิวตันเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับระบบพลศาสตร์โดยตรงและใช้เป็นแนวทางในงานวิจัยนี้

หลักการสั่นสะเทือนของรถยนต์

สภาพแวดล้อมจากการสั่นสะเทือนในรถยนต์ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งในการพิจารณาเพื่อสร้างรถยนต์ที่มี “คุณภาพ” โดยการสั่นสะเทือนจะส่งผ่านจากรถยนต์มาสู่ผู้โดยสารซึ่งมีผลต่อความพึงพอใจในการขับขี่รถยนต์ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบพลศาสตร์ของการขับขี่

ที่มา: Gillespie (1994)

ปัญญาและคณะ(2532) กล่าวว่า “ระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์ (Automotive Suspension System) มีหน้าที่สำคัญในการลดแรงสั่นสะเทือนจากการกระแทกและ สาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในรถยนต์อาจมีสาเหตุมาจาก

1. ความไม่เรียบของพื้นถนน
2. การไม่สมดุลของรถยนต์ (เครื่องยนต์สั่น)
3. การแกว่งของเพลา (Whirling)
4. แรงที่ลูกเบี้ยวกระทำ
5. การกระตุกเป็นจังหวะเนื่องจากการหมุน

ซึ่งการสั่นสะเทือนจากสาเหตุเหล่านี้อาจเป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) หรือการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced Vibration) ก็ได้”

R.S.Sharp and D.A. Corolla (1994) กล่าวว่า “ระบบรองรับความสั่นสะเทือนที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ระบบรองรับความสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟ (Passive Suspension System) ซึ่งประกอบด้วยสปริง (Spring) และโช้คอัพ (Shock Absorber) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าระบบรองรับความสั่นสะเทือนแบบอื่นๆ” ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อเดี่ยว (Quarter Car Suspension)

ที่มา: มิตรชุบิชิ มอเตอร์ส ประเทศไทย (2548)

ส่วนประกอบของระบบรองรับการสั่นสะเทือน

1. สปริง (Spring)

ยางของรถยนต์และเบาะรถยนต์เป็นตัวยืดหยุ่น และปรับการขรุขระเล็กน้อยๆของถนนให้เรียบ แต่การกระแทกจากหลุมหรือก้อนหินบนถนน ที่เกิดขึ้นหลายๆ จะมีสปริงเป็นตัวดูดกลืนรับภาระอันนี้ไว้ สปริงจะติดตั้งระหว่างล้อและตัวถังรถยนต์ ขณะที่รถยนต์ตกหลุมหรือป็นก้อนหิน สปริงจะรับแรงมากขึ้นหรือลดลงคือ ยุบตัวเข้าหรือยืดออก ทำให้ผลของการเคลื่อนไหวของล้อแล่นกลิ้งสัมผัสกับผิวถนนไปตามสภาพของถนนส่งต่อผ่านสปริงไปยังตัวรถน้อยลง

เชิรชัยและสมศักดิ์ (2533) กล่าวว่า “ผลของการติดตั้งสปริงเข้าระหว่างตัวถังรถยนต์กับ ล้อดังกล่าวจึงทำให้แยกหน้าที่ของสปริงได้ดังนี้

1. ลดแรงกระแทกจากถนน โดยรับแรงกระแทกแล้วเปลี่ยนเป็นการสั่น
2. ทำให้ล้อรถแล่นกลิ้งติดกับถนน ช่วยยึดเกาะถนนเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่
3. เพิ่มความสะดวกสบายในการขับขี่ ทำให้นั่งรถนุ่มและป้องกันสิ่งของที่บรรทุกมิให้เกิด กระแทกจนเสียหายได้”

1.1 คุณสมบัติของสปริง (ชัยสวัสดิ์,2528)

1.1.1 เมื่อปล่อยสปริงเป็นอิสระสปริงจะมีความยาวอันหนึ่ง

1.1.2 เมื่อกดหรือดึงสปริงด้วยแรงที่เท่ากันอันหนึ่งสปริงจะยุบหรือยืดตัวจากความยาวอิสระเป็นระยะเท่ากัน

1.1.3 ในกรณีที่กดสปริงด้วยแรงอันหนึ่ง ภายหลังเมื่อปล่อยสปริง สปริงจะยืดออกจนมีระยะเท่ากับความยาวอิสระ หลังจากนั้นจะยืดออกต่อไปอีกเป็นระยะเท่ากับระยะที่ถูกกดไว้ และจะหดกลับไป เท่ากับความยาวอิสระอีกครั้งหนึ่ง

1.1.4 ในกรณีที่สปริงถูกดึงด้วยแรงอันหนึ่ง ภายหลังเมื่อปล่อยสปริง สปริงจะยุบตัวจนมีระยะเท่ากับความยาวอิสระ หลังจากนั้นจะยุบตัวลงไปเป็นระยะเท่ากับระยะที่ถูกดึงไว้ และกลับยืดออกจนมีความยาวอิสระอีกครั้งหนึ่ง

นอกจากการใช้สปริงเพื่อจุดประสงค์หลักเพื่อด้านทานแรงกระแทกที่ล้อส่งผ่านมาให้แก่รถยนต์เมื่อวิ่งบนถนนที่ขรุขระหรือ ตกหลุมแล้ว สปริงชนิดแผ่นหรือแหนบยังได้นำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งของเพลาและล้ออีกด้วย

1.2 สปริงที่ใช้ในการกันสะเทือนรถยนต์ แบ่งเป็น

1.2.1 สปริงแผ่นหรือแหนบ (Laminated of leaf Spring)

1.2.2 สปริงขด (Coil Spring)

1.2.3 สปริงลาน (Volute Spring)

1.2.4 สปริงทอร์ชันบาร์ (Torsion-Bar Spring)

สปริงแผ่นมักใช้กับเพลาล้อที่เป็นคานแข็งส่วนใหญ่ แต่สปริงชนิดทอร์ชันบาร์จะนิยมใช้กับระบบรองรับความสั่นสะเทือนอิสระ ระบบรองรับความสั่นสะเทือนอิสระที่ใช้แหวนขวางทำหน้าที่เป็นสปริงแทนสปริงชนิดก็มีการใช้บ้าง สปริงของระบบรองรับของล้อหน้าจะถูกออกแบบให้แข็งแรงกว่าล้อหลัง เนื่องจาก

1. ทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงกระแทก
2. ควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อหน้าหรือแกนล้อหน้า
3. ด้านทานแรงที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยวของล้อหน้า

บัญชาและคณะ(2532) กล่าวว่า “สปริงจะต้านทานแรงกระแทกได้ดีกว่าแหวน ดังนั้นในงานเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสปริงชนิดหรือแหวน สปริงชนิดจะมีน้ำหนักประมาณครึ่งหนึ่งของแหวนเท่านั้น แต่แหวนสามารถทำหน้าที่ได้ 2 ประการคือ รับแรงกระแทกและควบคุมตำแหน่งของล้อ ซึ่งสปริงชนิดทำไม่ได้ ถ้าไม่มีชิ้นส่วนอื่นๆมาช่วยในการกำหนดตำแหน่งของล้อ ทอร์ชันบาร์จะทำให้การออกแบบทำได้กะทัดรัดขึ้นมากแต่คุณลักษณะยังคงดีกว่าสปริงชนิด”

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของสปริงในระบบรองรับการสั่นสะเทือน คือ การยุบตัวของสปริงในขณะที่รับน้ำหนักสูงสุด โดยที่เฟลคเตอร์ดังกล่าวสามารถเป็นตัวบ่งบอกสิ่งต่อไปนี้ได้

1. ความถี่ในการเคลื่อนที่ของสปริง กล่าวคือ ถ้าสปริงมีการเคลื่อนที่ (ยุบและยืดออก) ในอัตราที่พอเหมาะแล้วจะทำให้ผู้ขับขี่เกิดความสะดักสะบวยในการขับขี่
2. ความนิ่มของสปริงและความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ซึ่งหมายถึง ถ้าสปริงมีระยะยุบตัวมากจะแสดงว่าสปริงนั้นมีความนิ่มมาก การขับขี่จะมีความนิ่มนวลมากขึ้นด้วย แต่สปริงที่อ่อนมากเกินไปจะมีข้อเสียคือรับน้ำหนักได้ไม่ดี

1.3 การเดินของสปริง

เมื่อล้อรถยนต์ กระแทกกับสิ่งกีดขวาง สปริงของรถยนต์จะถูกกดอย่างรวดเร็ว สปริงแต่ละตัวพยายามที่จะคืนกลับไปยังสภาพเดิมโดยการยกตัวถังรถยนต์ให้กระเด็นขึ้น เมื่อสปริงมีการสะสมพลังงานไว้ในขณะถูกกดลง สปริงจึงกระเด็นขึ้นจนเลยระยะความยาวปกติของสปริงเพื่อปลดปล่อยพลังงานนั้นออกมาการเคลื่อนตัวของสปริงก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการกระเด็นขึ้น นอกเหนือความยาวตามปกติของสปริง เมื่อตัวถังเคลื่อนตัวลงอีกครั้ง จะดันสปริงลงต่ำกว่าความสูงปกติของสปริงเช่นกัน ดังนั้นสปริงจึงเกิดปฏิกิริยากระเด็นขึ้นอีกครั้ง กระบวนการนี้เรียกว่า การเดินของสปริงจะเกิดขึ้นซ้ำๆกันหลายครั้ง แต่การกระเด็นจะเกิดขึ้นน้อยกว่าที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นจนในที่สุดรถยนต์ก็จะหยุดการเคลื่อนที่ขึ้นลงถ้าการเดินขึ้นลงนี้ถูกปล่อยโดยไม่มี การควบคุม จะเป็นเหตุให้ไม่เพียงแต่การขับขี่ไม่สะดวกสบายเท่านั้น แต่ยังนำไปสู่ความไม่มีเสถียรภาพในการควบคุมรถด้วย เพื่อป้องกันสาเหตุนี้จึงจำเป็นต้องจัดให้โช้คอัพ

2. โช้คอัพ (Shock Absorber)

ทำหน้าที่หน่วงการกระแทกไม่ให้เดินตามการเดินของสปริงโดยการดูดซับพลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของสปริง โช้คอัพ จะติดตั้งอยู่ระหว่างคานและตัวรถ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถจะควบคุมการสั่นของสปริงได้ (Billiet and Alley, 1972) การติดตั้งโช้คอัพเข้าระหว่างคานล้อและตัวรถเพื่อควบคุมการสั่นของสปริง ก็ยังเป็นผลดีอย่างอื่น ๆ เพิ่มขึ้นแก่รถยนต์ด้วย เพราะแม้ว่ารถยนต์ได้รับการตั้งศูนย์ล้อ (Wheel Alignment) อย่างถูกต้องตามข้อกำหนดในคู่มือของรถยนต์นั้นๆแล้วก็ตาม โช้คอัพก็ยังเป็นตัวประกอบหนึ่งที่ทำให้รถสามารถควบคุมการขับขี่ และการทรงตัวที่ดี ถ้ายางรถยนต์เกิดสึกเร็วกว่าปกติและการทรงตัวของรถยนต์ไม่ดีเท่าที่ควร สิ่งที่ต้องพิจารณาอย่างหนึ่ง คือ โช้คอัพ

โช้คอัพที่มีใช้ในรถยนต์สมัยก่อนมีหลายรูปแบบ แบบเหล่านี้ทำงานโดยการอาศัยหลักการฟีด อากาศอัด และพลังไฮดรอลิก โช้คอัพเพียงอย่างเดียวที่ใช้ในทุกวันนี้ เป็นแบบการบรรจุน้ำมันไฮดรอลิกหรือน้ำมันโช้คอัพในกระบอกแล้วดันให้น้ำมันไฮดรอลิกไหลผ่านรูเล็กๆ (Orifice) ที่จำกัดการไหลของน้ำมันขณะที่โช้คอัพทำงานเมื่อสปริงยืดหดตัว การต้านหรือการหน่วงเหนี่ยว การเคลื่อนที่ของน้ำมันผ่านรูจำกัดเล็กๆ เป็นการหน่วงเหนี่ยวการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว

ของสปริงอย่างทันทีทันใด (เรียลซ์และสมคักด์ ,2532) ดังในภาพที่ 3 เพื่อแสดงระบบรองรับการสั่นสะเทือนในรถยนต์



ภาพที่ 3 ระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์
ที่มา: มิทซูบิชิ มอเตอร์ส ประเทศไทย (2548)

2.1 แบบของโช้คอัพที่ได้รับการออกแบบและติดตั้งในรถยนต์มี 2 แบบ

2.1.1 โช้คอัพที่รับภาระโดยตรง (Direct Acting) โช้คอัพแบบนี้จะติดตั้งให้รูเล็กเพื่อจำกัดการไหลของน้ำมัน ควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำมันโดยตรง ขณะที่เพลาล้อกับตัวรถปรับระยะอ่อนตัวยืดหยุ่นแก่กันและกัน โช้คอัพแบบนี้เป็นกระบอกยึดหด หรือที่เรียกว่า โช้คอัพกระบอก (Billiet and Alley ,1972) ติดตั้งทุกเพลลาของล้อรถโดยมีหูยางโช้คอัพหรือยางปลอกแกนโช้คอัพรองอยู่ในการยึดกับตัวรถหรือหูโช้คอัพที่ล้อเพื่อให้เกิดการอ่อนตัวเคลื่อนไหวได้อิสระและเป็นการดูดกลืนพลังงานการสั่นสะเทือนและพลังงานเสียงด้วย

2.2.2 โช้คอัพรับภาระทางอ้อม (Indirect Acting Shock Absorber) โช้คอัพแบบนี้พบน้อยในรถยนต์นั่ง แต่พบบ่อยในรถบรรทุก ปกติกระบอกสูบโช้คอัพ ที่บรรจุน้ำมันไฮดรอลิกจะติดอยู่ที่เหล็กวางข้างโครงรถ มีแขนต่อและก้านต่อจากกระบอกสูบของโช้คอัพไปยึดกับเพลาล้อหรือเสาแทรกแขนบหรือยึดติดกับปีกนกของระบบแขวนล้อ ดังนั้นการหน่วงการสั่นของสปริงซึ่ง

กระทำโดยรูเล็กจำกัดการไหลของน้ำมัน กระทำโดยการดันการไหลของน้ำมันในห้องสูบโดยผ่านทางแขนต่อ ก้านต่อและกระเดื่องลูกสูบ

2.2.3 เหล็กกันโคลง (Anti-Roll Bar or Stabilizer) เหล็กกันโคลงเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญของระบบรองรับการสั่นสะเทือนในรถยนต์นั่ง ซึ่งส่วนมากที่ต้องรักษาระดับของโครงรถหรือตัวรถขณะที่เลี้ยว โช้คอัพเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อแต่ละล้อ เหล็กกันโคลงเป็นตัวควบคุมการเอียงตัวหรือการโคลงตัวของรถ โดยการควบคุมการลอยขึ้นลงของโครงรถหรือตัวรถด้านในขณะที่ยาว เพราะขณะที่รถเลี้ยวจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของศูนย์กลางของรถเลื่อนออกไปด้านนอกของรัศมีโค้งของถนนเนื่องจากแรงเหวี่ยงหรือภาระที่รับ การแก้การเอียงของรถขณะที่เลี้ยวกรณีหนึ่ง คือ การสร้างพิวถนนทางโค้งให้ลาดเอียงลงทางด้านในของโค้งถนน จากการวิจัยพบว่าคนชอบขับรถด้วยความเร็วสูงๆ และชอบนั่งรถที่ใช้สปริงอ่อนนุ่ม การที่รถยนต์ติดตั้งสปริงอ่อนๆ และการแล่นด้วยความเร็วสูงๆ แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นขณะรถแล่นทางโค้งเป็นผลให้ตัวรถเอียงไปจากระดับปกติ คือ สปริงด้านหน้าของล้อด้านนอกของรัศมีเลี้ยวจะได้รับแรงกดมากกว่าทำให้ตัวรถต่ำลง ส่วนที่ตัวรถด้านในก็ยกลอยสูงขึ้น เหล็กกันโคลงเป็นเหล็กกล้าสปริงกลม ที่ผ่านการชุบให้มีคุณสมบัติสปริงตัว เช่นเดียวกับสปริงหรือแหนบรถยนต์ ทำเป็นรูปตัวยู ปลายทั้งสองข้างยึดติดกับปีกนกตัวล่างด้วยก้านต่อและ บูชยางเพื่อให้สามารถฟรีตัวเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ส่วนตรงกลางของเหล็กกันโคลงยึดติดกับโครงรถสองจุด ด้วยบูชยางและปลอกกรด ดังนั้นเมื่อตัวรถด้านหนึ่งด้านใดยุบตัวลงหรือลอยขึ้น ก็จะทำให้เกิดแรงบิดตัวขึ้นตรงส่วนกลางของเหล็กกันโคลงแบบเดียวกับแรงสปริงของทอร์ชันบาร์ เพราะทางอีกด้านหนึ่งของตัวรถด้านการยุบหรือลอยไว้แรงบิดนี้จึงควบคุมหรือฝืนการเอียงของรถไว้ เป็นการควบคุมให้ล้อทั้งสองเกิดการยุบหรือลอยตัวพร้อมๆกัน ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของตัวรถ การกระทำเช่นนี้เป็นการรักษาระดับของตัวรถไม่ให้เอียงและ โคลงไปมานั่นเอง เหล็กกันโคลงจะต้องติดตั้งให้ได้ศูนย์ไม่เอียงไปข้างใดข้างหนึ่ง คำว่าได้ศูนย์หมายถึงขณะที่รถจอดในที่ราบเรียบจะต้องไม่เกิดแรงบิดตัวในเหล็กกันโคลง มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเกาะถนนหรือการทรงตัวของรถและมีผลให้ควบคุมการขับขี่รถยากขึ้นซึ่งจะก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยและความไม่สะดวกสบายในการขับขี่นั่นเอง(เชียรชัยและสมศักดิ์ ,2532)

คุณสมบัติของระบบรองรับการสั่นสะเทือน

1. การสปริงตัว (Springness)

คือ แรงต้านต่อภาระหรือน้ำหนักที่รับและสามารถยืดหยุ่นได้ แต่อานาสปริงหรือแหนบมาใช้กับรถยนต์ เมื่อสปริงได้รับแรงกด และปล่อยแรงออกสปริงจะยืดและหดเข้าออกหลายๆครั้ง จนกว่าจะหยุดที่ขนาดความยาวเดิม อาการเช่นนี้เรียกว่า การสั่น(Oscillations) การสั่นนี้มีผลทำให้รถยนต์เต้นขึ้นลง ตามต้องการเต้นและสั่นของสปริงจนกว่าสปริงจะหมดอาการสั่น จากการสปริงตัวของระบบนี้ จึงทำให้ล้อของรถยนต์สัมผัสกับผิวหน้าถนนตลอดเวลา เป็นการทำให้รถยนต์เกาะถนนและทรงตัว พร้อมกันนั้นการสปริงตัวก็จะกันกระแทกของการที่ล้อกระทบกับถนนที่ไม่เรียบด้วย

2. การหน่วงหรือบรรเทาอาการสั่น (Damping)

เป็นความสามารถในการดูดกลืน พลังงานบางอย่างของสปริงหลังจากที่สปริงได้รับแรงกดซึ่งทำให้เกิดการสั่น โดยการเปลี่ยนพลังงานจากการสั่นเป็นพลังงานความร้อน พร้อมกันนั้นก็ยังมี ความสามารถบรรเทาอาการเค็งหรือเต้นของรถยนต์เพื่อลดเสียงดังและเพิ่มความอ่อนนุ่มแก่ผู้ขับขี่ด้วย

3. ต้านการโคลง (Anti-Rolling)

คือความสามารถต้านหรือลดการ โคลงของตัวรถยนต์ เพราะในขณะที่รถยนต์เลี้ยวจะเกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงให้ตัวรถเอียงออกจากจุดศูนย์กลางการเลี้ยว ทำให้รถยนต์และผู้โดยสารมีการทรงตัวได้ดี

น้ำหนักที่ถูกรองรับและน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ

ตัวถังของรถยนต์ถูกรองรับไว้ด้วยสปริง น้ำหนักของตัวถังซึ่งรองรับไว้ด้วยสปริงนี้เรียกว่า น้ำหนักที่รองรับด้วยสปริง (Sprung mass) ในทางตรงกันข้ามล้อและเพลา รวมทั้งชิ้นส่วนอื่นๆของรถยนต์ซึ่ง ไม่ได้ถูกรองรับไว้ด้วยสปริงเรียกว่า น้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับด้วยสปริง (Unsprung mass)

กล่าวโดยทั่วไปได้ว่าการมีน้ำหนักที่ถูกรองรับมากกว่าจะทำให้เกิดความสะดวกสบายในการขับขี่ได้ดีกว่าเพราะว่าเมื่อทำให้มีน้ำหนักที่ถูกรองรับมาก การเหวี่ยงตัวและการกระแทกของตัวถังรถยนต์จะลดลงในทางกลับกันถ้าน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับมีมาก การกระแทกตัวของตัวถังรถก็จะเกิดขึ้นได้ง่าย การสั่นสะเทือนและการกระแทกของชิ้นส่วนที่ถูกรองรับของรถยนต์โดยเฉพาะตัวถังมีผลต่อความสะดวกสบายในการขับขี่เป็นอย่างยิ่ง

การสั่นสะเทือนของน้ำหนักที่ถูกรองรับ

1. การกระดอนแนวแนวยาว (Pitching)

การกระดอน คือการสั่นสะเทือนขึ้นหรือลงของรถด้านหน้าและด้านหลัง โดยสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางของตัวถังรถ อาการนี้เกิดขึ้นโดยเฉพาะเมื่อรถยนต์วิ่งบนถนนที่เป็นร่องหรือการกระแทกเมื่อเคลื่อนที่ไปบนถนนที่ไม่ได้ลาดยางและเต็มไปด้วยหลุมบ่อ อาการกระดอนนี้เกิดขึ้นได้ชัดเจนในรถยนต์ที่มีสปริงหรือแหนบที่แข็ง

2. การโคลงตัว (Rolling)

เมื่อทำการเลี้ยวหรือเมื่อรถยนต์วิ่งบนถนนที่เป็นหลุมบ่อ สปริงด้านหนึ่งของรถยนต์จะยึดตัวขึ้นในขณะที่อีกด้านหนึ่งจะยุบตัวลง พฤติกรรมดังกล่าวทำให้ตัวถังรถยนต์เกิดการโคลงตัวไปทางด้านข้าง คือจากข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง

3. การกระโดด (Bouncing)

การกระโดด คือ การเคลื่อนไหวขึ้นและลงของตัวถังรถยนต์ทั้งคัน เมื่อรถวิ่งบนถนนที่ไม่ราบเรียบด้วยความเร็วสูง การกระโดดนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อใช้สปริงหรือแหนบที่อ่อน

4. การส่าย (Yawing)

การส่าย คือ การเคลื่อนไหวของตัวถังรถยนต์ไปทางซ้ายและขวาตามเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของรถ โดยสัมพันธ์กับจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์เมื่อเกิดการกระดอน จะเกิดการส่ายไปพร้อมกัน

การสั่นสะเทือนของน้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับ

1. การเต้น (Hopping)

การเต้น คือ การเคลื่อนที่ขึ้นลงของล้อ(คู่มือและยาง) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบนถนนที่เป็นลูกคลื่น ในขณะที่ขับขี่ที่ความเร็วปานกลางและความเร็วสูง

2. การกระดอนตามขวาง (Tramping)

การกระดอน คือ การเคลื่อนที่ขึ้นและลงในทิศทางตรงข้ามของล้อรถด้านซ้ายและขวา เป็นเหตุให้เกิดการเต้นบนผิวถนน พฤติกรรมดังกล่าวนี้มักเกิดขึ้นได้ง่ายในรถยนต์ซึ่งใช้ระบบรองรับแบบคานแข็ง

3. การม้วนตัว (Wind-Up)

การม้วนตัวคือปรากฏการณ์ที่เหน็บพยายามที่จะม้วนตัวเองรอบเพลานี้เนื่องจากแรงขับเคลื่อนผลักดัน

4. การกระแทกท้าย

การกระแทกท้าย เกิดขึ้นเมื่อมีการเต้นกระแทกปีกนกดตัวล่าง หรือเพลากับโคลงรถเพราะสปริงถูกกดลงไปจนเกินขีดจำกัดของสปริงหรือเมื่อระบบรองรับรับภาระมากเกินไป

ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่รถยนต์แล่นผ่านสันบนถนน

โดยสมมติให้ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหน้าและระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหลังต่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน หากพิจารณารถยนต์ที่มีระบบรองรับความสั่นสะเทือนเป็นสปริงชนิด เมื่อล้อหน้าของรถยนต์กระทบบนสันบนถนน สมมติให้ สูง d หน่วย ขณะที่ยางรถเกิดการกระทบบนสันบนถนน สปริงจะยุบตัวลงไปทันที d หน่วย และหลังจากนั้นสปริงจะยืดกลับไปยังสภาพเดิม ขณะที่สปริงยืดตัวออกจะดันให้ช่วงหน้าของรถยนต์ยกสูงขึ้น ทำให้ผู้ขับขี่ถูกแรงกระทบบนสันบนถนนให้กระดอนขึ้นไปจากที่นั่งด้วย

ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่รถยนต์แล่นผ่านแอ่งบนถนน

โดยสมมติให้ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหน้าและระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหลังต่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ขณะที่รถแล่นผ่านแอ่งบนถนน จะทำให้สปริงของระบบรองรับมีการหดและยืดตัวคล้ายคลึงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากรถแล่นสะกดคัสบนถนน แต่ปรากฏการณ์ที่รถแล่นผ่านแอ่งบนถนน แพลตฟอร์มที่เกี่ยวข้องจะมีทั้งน้ำหนักของมวลรถส่วนที่อยู่เหนือสปริง (Sprung Weight) น้ำหนักของมวลรถส่วนที่ได้สปริง (Unsprung Weight) และความเร็วของรถ

ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่รถยนต์กระเพื่อมขึ้นลง

การที่รถแล่นสะกดคัสบนถนนและการแล่นผ่านแอ่งบนถนนใน 2 กรณีข้างต้นนั้น โดยสมมติให้ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหน้าและระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหลังต่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน แต่ในความเป็นจริงนั้น ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหน้าและล้อหลังมีความสัมพันธ์ต่อกัน เมื่อระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหน้าทำงานจะมีผลต่อเนื้อทำให้ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของล้อหลังทำงานด้วย นั่นคือ เมื่อรถแล่นผ่านแอ่งบนถนน ขณะที่ล้อหน้าของรถเริ่มผ่านแอ่ง สปริงล้อหน้าจะยืดตัวออกเพื่อให้ล้อรถแตะพื้นตลอดเวลา หลังจากนั้น ช่วงเวลาหนึ่งสปริงล้อหน้าจะยุบตัวลง พร้อมกับคิงมวลของรถส่วนที่อยู่เหนือสปริงยุบตัวลงด้วย เมื่อมวลของรถส่วนที่อยู่เหนือสปริงของล้อหน้ายุบตัวลง จะทำให้ส่วนท้ายของรถกระดกขึ้นมีผลต่อเนื้อทำให้รถกระเพื่อมขึ้นลง ลักษณะการยุบและการกระดกของมวลของรถเหนือสปริงหรือตัวถังรถจะกระทำรอบจุดศูนย์กลางของรถยนต์

ปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน

การเคลื่อนที่แบบสั่นไป-มา ของระบบที่ประกอบด้วยมวลและมีสภาพยืดหยุ่นในช่วงเวลาที่กำหนดหนึ่งๆ เรียกว่า การสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนทางกลจะพิจารณาให้เป็นการเคลื่อนที่เป็นคาบการสั่นสะเทือนทางกลจำแนกออกเป็นสอง ประเภท ดังนี้

1. การสั่นสะเทือนแบบอิสระ(Free Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบ โดยปราศจากแรงภายนอก

2. การสั่นสะเทือนแบบบังคับ(Forced Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบอันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ของแรงที่มากระตุ้นระบบ ถ้าความถี่ของแรงภายนอกที่กระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ ระบบจะอยู่ในสภาวะการสั่นพ้อง (Resonance) นั่นคือ ขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายขึ้นอย่างมากจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

สัญญาณการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากรถยนต์จะสามารถบ่งบอกถึงสภาพต่างๆที่เกิดขึ้นกับตัวรถยนต์ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วย ความถี่ ขนาดของการสั่นสะเทือนและมุมเฟส

1. ความถี่

ความถี่ในที่นี้หมายถึง ความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งหากพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาก็จะหมายถึง จำนวนรอบของการสั่นต่อหน่วยเวลา ซึ่งความถี่จัดเป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงสภาพการสั่นสะเทือนของรถยนต์

2. ขนาดของการสั่นสะเทือน

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้บ่งบอกสภาพของการสั่นสะเทือน หากมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึง ความไม่สะดวกสบายในการขับขี่และสูญเสียเสถียรภาพในการขับขี่ ขนาดการ

สั่นสะเทือนนิยมใช้อยู่หลายชนิด ได้แก่การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration)

3. มุมเฟส

จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนชิ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกชิ้นหนึ่ง

หน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือน

เมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งในรูปแบบของการขจัด ความเร็ว ความเร่งนั้นอยู่ในรูปคลื่นไซน์หรือรูปเป็นคาบ ซึ่งมีทั้งค่าบวกและค่าลบและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา การบอกขนาดของการสั่นสะเทือนในลักษณะการบอกขนาดโดยรวม (Overall Value of Vibration) ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. ระดับยอดสูงสุด (Peak level) เป็นการบอกค่าระดับสูงสุดของสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปจากระดับศูนย์ ทั้งนี้ได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนอย่างอื่น ค่านี้นิยมใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ
2. ระดับยอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดอีกยอดหนึ่ง (Peak to Peak level) ซึ่งก็คือการบอกค่าขนาดสัญญาณที่วัดจากจุดสูงสุดทางบวกกับจุดต่ำสุดทางลบ
3. ค่าเฉลี่ย (Average level) เป็นค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งในกรณีทั่วไปที่สัญญาณการสั่นสะเทือนมีค่าเป็นทั้งบวกและลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งสมดุลซึ่งจะทำให้เป็นค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะคิดโดยทำการเปลี่ยนเครื่องหมายของขนาดสัญญาณที่ลบให้เป็นบวก(Rectified) แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยออกมา
4. ค่าอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square,RMS) เป็นค่าที่ได้จากการนำสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสองแล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สอง

5. ค่าแฟกเตอร์เครสท์ (Crest factor) เป็นอัตราส่วนของระดับสูงสุด(Peak level) กับค่า RMS level ซึ่งค่าดังกล่าวจะให้ข้อมูลว่าลักษณะการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีแนวโน้มเป็นการสั่นสะเทือนลักษณะแบบกระแทก (Impulse) หรือแบบสุ่ม (Random) ในกรณีที่เป็นลักษณะแบบกระแทกค่าแฟกเตอร์เครสท์จะสูง ส่วนกรณีที่เป็นลักษณะสุ่มค่าแฟกเตอร์เครสท์จะต่ำ

ระดับขั้นความเสรี

ระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) ของระบบหมายถึง จำนวนพิกัดอิสระต่ำสุดที่ใช้กำหนดตำแหน่งหรือกำหนดการเคลื่อนที่สมบูรณ์ของระบบ (มนตรี,2542) เป็นที่ทราบกันว่าวัตถุแข็งเกร็งซึ่งอยู่อย่างอิสระในที่ว่าง(Space) จะมีลำดับขั้นความเสรีเป็นดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งแบบเลื่อนตำแหน่ง ลำดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 คือ

- 1.1 การตั้งขึ้นลง
- 1.2 การโยกไปทางซ้ายและทางขวา
- 1.3 การเคลื่อนไปข้างหน้าและข้างหลัง

2. การเคลื่อนที่แข็งเกร็งแบบหมุนลำดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 คือ

- 2.1 การโคจรรอบแกนตามแนวยาวของรถ (Longitudinal motion)
- 2.2 การกระดกรอบแกนแนวแกนตามขวาง (Lateral motion)
- 2.3 การปีดเจรอบแนวแกนในแนวตั้ง (Vertical motion)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การคำนวณหรือการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นทางกลศาสตร์วิศวกรรมนั้นอาจแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแปรสภาพความเป็นจริงของปัญหาซึ่งอาจซับซ้อนมาก มาเป็นเครื่องหมายหรือสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นปัญหาทางค่านวิศวกรรม

2. การหาคำตอบหรือการแก้สมการ ซึ่งเป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์

3. การแปลความหมายของคำตอบทางคณิตศาสตร์ให้เป็นภาษาของวิศวกร เพื่อนำไปใช้ในสภาพความเป็นจริง

ดังนั้นคณิตศาสตร์จึงเป็นวิชาที่สำคัญยิ่งในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมทุกแขนงวิชา เพื่อให้สามารถที่จะหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบโดยตั้งข้อสมมติฐาน การประมาณอย่างมีเหตุผล เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด (ศิริศักดิ์, 2543)

ระบบทางพลศาสตร์ สามารถที่จะแทนหรือบรรยายพฤติกรรมของระบบได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งมีการพัฒนามาจากกฎทางฟิสิกส์ เช่น กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เป็นต้น การบรรยายคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของระบบ ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เรียกว่า การจำลองระบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) โดยทั่วไปจะใช้วิธีการแทนค่าพารามิเตอร์ในระบบด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียล จากนั้นใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการอินพุต กับสมการเอาต์พุต ซึ่งอยู่ใน S โดเมน เรียกว่า Transfer Function

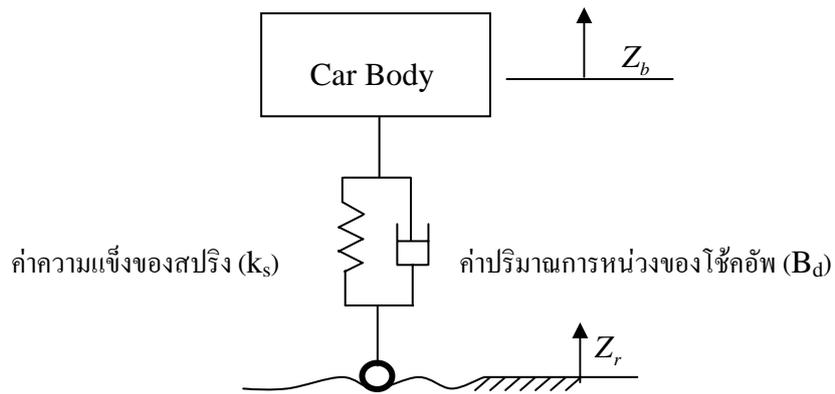
การจำลองสมการของระบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นเมื่อสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าคงที่ หรือเป็นฟังก์ชันตัวแปรเท่านั้น โดยพิจารณาหลักการของซูเปอร์โพสิชัน และคูผลตอบสนองของระบบ ถ้าเหตุและผลเป็นสัดส่วนกัน จะหมายถึงหลักการของซูเปอร์โพสิชันเป็นจริง จะถือว่าระบบนั้นเป็นระบบสมการเชิงเส้น

การออกแบบระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำเป็นที่ต้องตรวจสอบผลตอบสนอง (response) ของระบบต่อสัญญาณที่ป้อนเข้าเพื่อทดสอบคุณสมบัติของระบบและผลตอบสนอง โดยการป้อนสัญญาณที่มีรูปร่างแน่นอน เช่น สัญญาณแบบหนึ่งหน่วย (Step function) แบบพัลส์ (Pulse) แบบลาด (Ramp function) และแบบซายน์ (Sinoslidal function) เป็นต้น เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับระบบแล้วจึงพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบในโดเมนความถี่ (Frequency Response) เพื่อหาผลตอบสนองชั่วขณะของระบบ (Transient Responce) ซึ่งเป็น

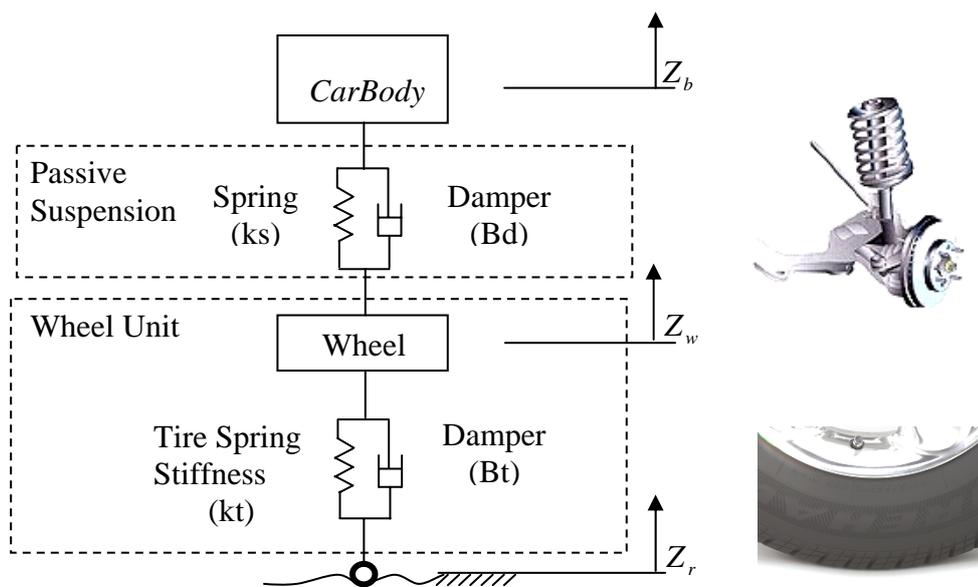
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบทันทีทันใดหลังจากสัญญาณอินพุทเริ่มเปลี่ยนจนกระทั่งเข้าสู่จุดหยุดนิ่งในการจำลองแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของรถยนต์ สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวแทนพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบ แบบจำลองอาจถูกเสนอขึ้นมาในหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานและสิ่งแวดล้อมที่ปรากฏอยู่ ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองจะต้องคำนึงถึงความง่าย มีความแม่นยำ ของการวิเคราะห์ไปพร้อมๆกัน

แบบจำลองของรถยนต์ชนิดล้อเดี่ยว(Quarter Car Model) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจกล้อรถยนต์ล้อเดี่ยวเพื่อใช้แทนลักษณะการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และใช้พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบ ประกอบด้วยตัวรถยนต์ 1/4 ส่วน , ล้อ (คุมล้อและยาง) และระบบรองรับการสั่นสะเทือน สามารถเขียนเป็นแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเสรีเท่ากับ 1-DOF & 2-DOF ได้ตามภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ แบบจำลองดังกล่าวมีจุดด้อยคือมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเท่านั้น แต่ก็สามารถแสดงลักษณะพื้นฐานการออกแบบระบบรองรับความสั่นสะเทือนได้

แบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเสรี เท่ากับ 1 เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลรถยนต์อย่างเดียว ส่วนแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2 เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่อิสระของมวลรถยนต์และล้อ(คุมล้อและยาง) การศึกษาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการจับข้ออย่างปลอดภัย, สะดวกสบายและการทรงตัวที่ดีที่สุด เริ่มต้นตั้งแต่ปี 1960 โดยใช้แบบจำลองของรถยนต์แบบ 1-DOF & 2-DOF ทั้งระบบที่เป็นแบบแอคทีฟ (Active Suspension System) และ ระบบที่เป็นแบบพาสซีฟ (Passive Suspension System) กระทบกับคุมล้อ และผลลัพท์ที่ได้ทำให้การควบคุมการจับจี้ที่ดีขึ้น จะสังเกตเห็นพฤติกรรมดังกล่าวได้ในแบบจำลอง แบบ 2-DOF ดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5



ภาพที่ 4 แบบจำลองของรถยนต์ชนิดล้อเดี่ยว(quarter car) และระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟในรูปแบบจำลองรถยนต์ที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 1



ภาพที่ 5 แบบจำลองของรถยนต์ชนิดล้อเดี่ยวและระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟ ที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ได้แก่ โปรแกรม MATLAB / SIMULINK

1. ลักษณะเด่นของโปรแกรม MATLAB

1.1 ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้ในการคำนวณมากมายตลอดจนเราสามารถสร้างฟังก์ชันขึ้นมาใช้งานได้เองในสาขาที่ต้องการ

1.2 Algorithm พัฒนาง่ายได้ไม่ยุ่งยาก

สามารถแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ง่ายและรวดเร็วกว่าภาษาอื่นๆ เช่น C, Fortran, Basic เป็นต้น

1.3 มีโครงสร้างแบบจำลอง (Simulink)

ซึ่งเป็นชุดคำสั่ง ที่เรานำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ทดสอบและประเมินผลกระบวนระบบพลศาสตร์(Dynamic) ต่างๆก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

1.4 สามารถที่จะทำการวิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลได้ง่ายและรวดเร็ว

1.5 ด้านกราฟิก

นำไปใช้งานทางด้านกราฟิกได้เป็นอย่างดีทั้งในด้านการแสดงภาพตั้งแต่สองมิติที่เป็น (Rectangular polar Stair Bar) รวมทั้งภาพสามมิติในรูปแบบพื้นผิวและระดับสูงต่ำ(Contour) ตลอดจนสามารถนำภาพมาต่อกันและเก็บไว้เพื่อที่จะสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวได้

1.6 ประยุกต์ใช้ในการสร้างรูปแบบกราฟฟิก (Graphical User Interface)

โดยการเลือกใช้ Object และเมนูต่างๆ โดยโปรแกรม MATLAB จะมีเครื่องมือให้เลือกใช้ เช่น เมนู รายการ ปุ่มกดและ รูปภาพต่างๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกนำไปใช้ในการทำงาน ปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้

1.7 ทำการประมวลผลร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ ได้

Matlab สามารถประมวลผลร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ เช่น Fortran , Borland C/C++ , Microsoft Visual C++ และ Watcom C/C++ ด้วยการเขียนฟังก์ชันที่เป็น Mex ไฟล์ โดยโปรแกรม MATLAB จะเรียกใช้รoutines จากภาษา C และ Fortran

1.8 โปรแกรม MATLAB เป็นระบบปฏิสัมพันธ์

ซึ่งส่วนของข้อมูลพื้นฐานเป็นอาร์เรย์ที่ไม่ต้องการมิติ ทำให้โปรแกรม MATLAB สามารถทำการแก้ไขปัญหาทางเทคนิคต่างๆ ได้มาก ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า และดีกว่า โปรแกรมภาษา C และ Fortran

2. โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB

โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย 5 ส่วนใหญ่ๆ คือ

2.1 ภาษาโปรแกรม MATLAB (The Matlab language)

Matlab เป็นโปรแกรมภาษาขั้นสูงที่ใช้ควบคุมฟังก์ชัน โครงสร้างข้อมูลอินพุท/เอาต์พุท (Flow Statements) และลักษณะของโปรแกรม Object-Oriented Programming ทำให้การเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับการเขียนด้วยภาษาอื่นๆ เช่น C , Fortran , Basic เป็นต้น

2.2 สถาปัตยกรรมในการทำงานของ Matlab (The Matlab Working Environment)

Matlab จะมีกลุ่มของเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานของผู้ใช้โปรแกรม หรือโปรแกรมเมอร์ประโยชน์ที่กล่าวมานี้ก็คือ การจัดการตัวแปรในพื้นที่ว่าง (Work Space) ต่างๆ การนำข้อมูลหรือการผ่านค่าตัวแปรเข้า/ออกและกลุ่มเครื่องมือต่างๆ นี้ก็จะใช้ในการพัฒนา จัดการ ตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรม(Debugging) ที่ได้เขียนขึ้น

2.3 ฟังก์ชันในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (The Matlab Matemtical Function Library)

Matlab จะมีไลบรารีทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณอย่างกว้างขวาง เช่น Sine ,Cosine และ ฟังก์ชันเชิงซ้อน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟังก์ชันหรือไลบรารีเพิ่มเติมจากไลบรารีที่ใช้กัน อยู่โดยทั่วไป เช่น ฟังก์ชัน ในการหาค่าเฉพาะจาง(Eigenvalues)และเวกเตอร์เฉพาะจาง(Eigenvector) การ แยกตัวประกอบและส่วนประกอบของเมตริกซ์ด้วยวิธีการต่างๆ การวิเคราะห์ข้อมูล การหาค่า ความน่าจะเป็น และการแก้ไขปัญหาระบบสมการเชิงเส้นที่เป็นพื้นฐานการจำลองสถานการณ์ ของ สาขาวิชาต่างๆ เป็นต้น ทำให้โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันสำหรับการใช้งานค่อนข้างมากและ ครอบคลุมในรายละเอียดของการคำนวณในสาขาวิชาต่างๆ ได้มากขึ้น

2.4 Handle graphics

ระบบกราฟฟิกของ Matlab จะประกอบไปด้วยคำสั่งขั้นสูงสำหรับการพล็อตกราฟโดย มีพื้นฐานอยู่บนแนวความคิดที่ว่าทุกสิ่งบนหน้าต่างรูปภาพของ โปรแกรมจะเป็นวัตถุ ซึ่งเป็น เอกลักษณ์เฉพาะตัวของระบบกราฟฟิกในประกอบด้วยคำสั่งขั้นสูงที่สามารถเลือกใช้ในการสร้าง การเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกบนพื้นฐานการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรมยังมีฟังก์ชันที่ ใช้สำหรับแสดงภาพสองมิติ ภาพสามมิติและการสร้างภาพเคลื่อนไหวได้

2.5 The Matlab Application Program Interface (API)

API จะใช้เพื่อการสนับสนุนการติดต่อจากภายนอกโดยใช้โปรแกรมที่เชื่อมต่อโปรแกรม ภายนอก(Mex) ซึ่งเป็นไฟล์ที่เขียนขึ้น โดยใช้ ฟังก์ชัน โปรแกรมที่เชื่อมต่อ โปรแกรมภายนอกใน Matlab ซึ่งจะเรียกใช้รูทีนจากโปรแกรมภาษา C และ Fortran หรืออาจกล่าวได้ว่า API เป็นไลบรารีที่

เขียนด้วยโปรแกรมภาษา C และ Fortran ที่มีการเชื่อมต่อ โปรแกรม Matlab ด้วยไฟล์ที่เป็น โปรแกรมที่เชื่อมต่อ โปรแกรมภายนอกอีกทั้ง Matlab API นี้ยังมีความสามารถสำหรับเรียกดูที่นจาก Matlab (Dynamic Linking) ก็ได้

นอกจากลักษณะเด่นของโปรแกรมทั้ง 5 ประการที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว โปรแกรม Matlab ยังมีเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และทดสอบระบบโดยการจำลองขึ้นซึ่งก็คือ จำลอง สถานการณ์(Simulink)

3. Simulink

เป็นโปรแกรมที่ควบคู่กับ Matlab ซึ่งเป็นระบบปฏิสัมพันธ์ สำหรับการจำลองและการ วิเคราะห์ระบบไดนามิกต่างๆ ที่เป็นระบบเชิงเส้น(Linear)ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear)โปรแกรม สิมูเลชัน เป็นโปรแกรม ที่สามารถใส่ระบบโมเดลโดยการวาดบล็อกไดอะแกรมบนจอภาพด้วยการ ใช้เมาส์ (Mouse-driver) ทำให้โปรแกรม Matlab สามารถที่จะทำการจำลองระบบได้หลายรูปแบบ เช่น เชิงเส้น (Linear)ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เวลาที่ต่อเนื่อง (Continuous-times) เวลาไม่ ต่อเนื่อง (Discrete-time)และระบบหลายอัตรา(Multirate) ซึ่งแต่ละรูปที่นำมาสร้างแบบจำลองใน การวิเคราะห์นี้ ผู้ใช้งานจะต้องมีความเข้าใจพื้นฐานการทำงานของบล็อกแต่ละไดอะแกรมเป็น อย่างดี ตลอดจนเข้าใจระบบโดยรวมของงานที่จะกระทำด้วย หน้าต่างไลบรารีจะมี กล่องคำสั่งที่แบ่ง หมวดหมู่ ดังนี้

1. หมวดหมู่ไดอะแกรมของการกำเนิดสัญญาณ(Source Library)
2. หมวดหมู่ไดอะแกรมของการแสดงเอาต์พุต (Sink Library)
3. หมวดหมู่ไดอะแกรมของการอธิบายฟังก์ชันเชิงเส้น (Continuous Library)
4. หมวดหมู่ไดอะแกรมของการใช้จำลองระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Library)
5. หมวดหมู่ไดอะแกรมของการอธิบายฟังก์ชันคณิตศาสตร์ทั่วไป (Math Library)

6. หมวดหมู่ไลบรารีของการอธิบายฟังก์ชันทั่วไปและตาราง (Functions & Tables Library)
7. หมวดหมู่ไลบรารีของการใช้แทนระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Library)
8. หมวดหมู่ไลบรารีของการใช้รวบรวมสัญญาณ (Signal & systems)
9. หมวดหมู่ไลบรารีพิเศษสำหรับเป็นกล่องเครื่องมือในงานสาขาต่างๆ (Blockset & Toolboxes)

โปรแกรม Matlab สามารถจำลอง ทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้โดยการใช้การจำลองสถานการณ์ (Simulink) ซึ่งเป็นเครื่องมือ(toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรม Matlab โดยการทำงานภายใต้หน้าต่างๆที่เป็นการเชื่อมต่อทางรูปภาพ (GUI) ของการจำลองสถานการณ์เท่านั้น คำว่า Simulink มาจากคำสองคำ คือ Simulation and Link การใช้งานโปรแกรม Simulink จะกระทำโดยการนำบล็อกไลบรารีแต่ละ บล็อกในหน้าต่างไลบรารีมาต่อรวมกันตามที่เรารต้องการและสามารถจำลองระบบได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้น ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง การจำลองระบบสามารถกระทำได้โดยการป้อนอินพุตให้กับระบบที่สร้างไว้แล้วดูผลลัพธ์ของระบบเนื่องจากอินพุตที่ป้อนเข้าไป

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้งานใน 5 หมวดที่สำคัญดังนี้

1. Source Library

จะประกอบด้วย Block จะเกี่ยวข้องกับการกำเนิดสัญญาณเพื่อที่จะนำเข้าไปใช้เป็นอินพุตให้กับระบบ เช่น Constant , Signal, Generator, Step, Ramp, Sine Wave, Repeating, Discrete Pulse Generator , Pulse Generator , Chirp Signal, Clock , Digital Clock, Workspace, Random Number, Uniform Random Number และ Band Limited White Noise เป็นต้น

2. Sink Library

จะประกอบด้วยอุปกรณ์ หรือ Block ที่ใช้แสดงผลซึ่งเป็นเอาต์พุต (Output) ของระบบ หรือเอาต์พุตในแต่ละ Process เช่น Scope , XY Graph ,Display, To File,To Workspace และ Stop Simulink เป็นต้น

3. Continuous Library

จะประกอบด้วย Block ที่ใช้อธิบายฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Functions) เช่น Integrator,Derivative,State-Space,Transfer Fcn, Zero-Pole Memory,Transport Delay และ Variable Transport Delay เป็นต้น

4. Discrete Library

จะประกอบด้วย Block ที่ใช้จำลองระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง เช่น Zero-Order Hold ,Unit Display,Discrete State-Space, Discrete Filter,Discrete Transfer Tcn, Discrete zero-Pole และ First-Order Hold เป็นต้น

5. Math Library

จะประกอบด้วย Block ที่ใช้สำหรับอธิบายฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ทั่วไป เช่น Sum,Product,Gain,Slider Gain,Math Function ,Trigonometric Function,Abs,Sign,Combinatorial Logic, Logic Operator , Relational Operator,Complex to Magnitude-Angle to Complex และ Algebraic Constraint เป็นต้น (มนัสและคณะ,2543)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์ 4 ล้อแบบแอดทีฟ ในสภาพถนนแบบต่างๆ และใช้ลำดับชั้นความเสถียร เท่ากับ 7 โดยการไ้ใช้รถยนต์จริง ที่มีเครื่องมือวัดสภาพถนน และเปรียบเทียบระหว่างระบบPassive Suspension , Non-Preview Active

และ Active Suspension พบว่า ระบบแอกทิฟสามารถลดแรงความสั่นสะเทือนได้ดีกว่าระบบอื่นๆ ในสภาพถนนที่ขรุขระ (Kim ,Hyo-Jun และคณะ, 2002)

จากการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ระบบรองรับความสั่นสะเทือนของรถยนต์ชนิด 4 ล้อ แบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแอกทิฟโดยใช้เทคนิคไดนามิกสัญญาณ พบว่า อุปกรณ์ อันประกอบด้วยความแข็งของสปริงและ โช้คอัพ มีพฤติกรรมแบบ ไม่เชิงเส้น (Felipe และคณะ, ม.ป.ป.)

จากการศึกษาของแคมเปอร์หรือตัวหน่วงในระบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชชีฟ พบว่า เมื่อแคมเปอร์มีอัตราส่วนเท่ากับ 25 – 45 % จะสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนได้ดี ซึ่งจะไม่ตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Kashani, ม.ป.ป)

จากการศึกษาอิทธิพลของความสั่นสะเทือนที่มีต่อสมมาตรของรถยนต์บนถนนที่ไม่เรียบแบบจำลองขอรยนต์ชนิดล้อเดี่ยว โดยการใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ในการศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของรถยนต์พบว่า น้ำหนักของรถยนต์และความแข็งของสปริงมีผลต่อการสั่นสะเทือน หากมีน้ำหนักมากจะทำให้การสั่นสะเทือนน้อยลงและหากมีความแข็งของสปริงมากจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้นทำให้ไม่สะดวกสบายในการขับขี่ แต่อย่างไรก็ตาม การที่สปริงแข็งมากก็สามารถที่บรรทุกน้ำหนักได้มากเช่นกัน (Rajalingham และคณะ, 2002)

คุณภาพของการขับขี่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผสมผสานอย่างเหมาะสมระหว่างระยะการขจัดในแนวตั้งและระยะขจัดในแนวเชิงมุมของการเคลื่อนที่ โดยสภาพผิวถนนที่มีความขรุขระมีอิทธิพลสำคัญต่อคุณภาพในการขับขี่ (J.Campos และคณะ, ม.ป.ป)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. เครื่องพิมพ์
3. โปรแกรม MATLAB/SIMULINK (MATLAB 7.0)

วิธีการ

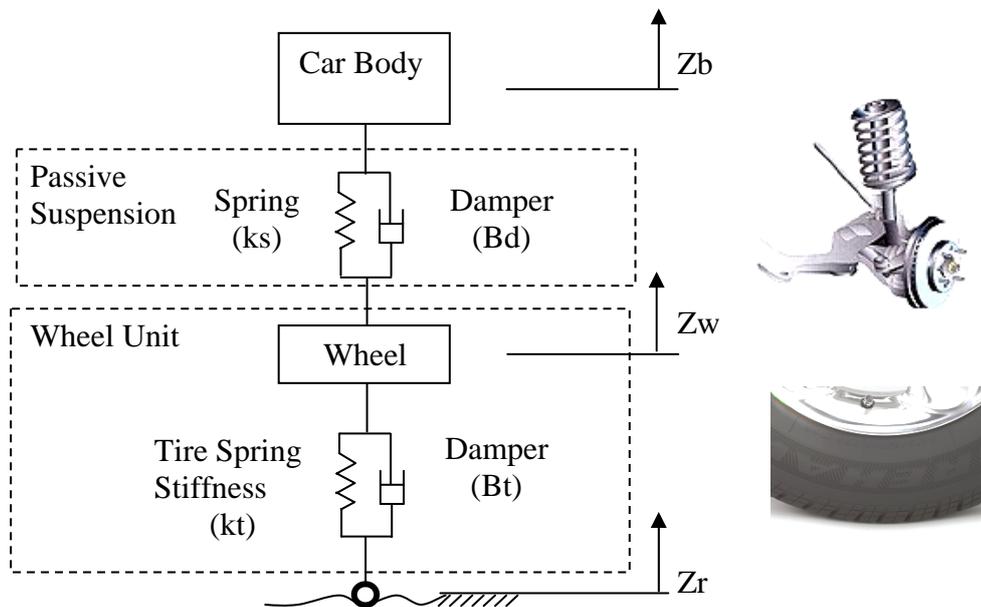
1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic modeling) เป็นตัวแทนของระบบที่สร้างขึ้นโดยมีเป้าหมายเพื่อการศึกษาและพยากรณ์เหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบถ้ามีการกระทำอย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายๆอย่างต่อแบบจำลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีควรมีความเรียบง่ายและมีพฤติกรรมเป็นไปตามปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ สามารถทดสอบคุณลักษณะและคุณสมบัติได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวอาจเป็นการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ เชิงตัวเลข หรือเป็นการป้อนบางสิ่งบางอย่างเพื่อให้แบบจำลองทำงาน แล้วสังเกตผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นซึ่งเราเรียกว่า การจำลองสถานการณ์ (Simulation)

การเลือกระบบรองรับการสิ้นสะท้อนของรถยนต์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน หากรถใช้เพื่อการโดยสารเป็นหลัก จะมุ่งเน้นในเรื่องของความสะดักสะบวยในการขับขี่หรือการโดยสาร ในขณะที่ รถที่ใช้เพื่อการแข่งขัน จะมุ่งเน้นในด้านของความเร็วและประสิทธิภาพในการจับเกาะถนนเป็นสาเหตุสำคัญในการออกแบบ สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของรถยนต์เพื่อการโดยสารเป็นหลัก ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยและความสะดักสะบวยในการขับขี่ ทั้งนี้ตัวแปรที่ต้องทำการวิเคราะห์ จึงได้แก่ ความเร่งของรถยนต์, ระยะชักของ ระบบรองรับการสิ้นสะท้อนและ ระยะการสปริงตัวของยาง เนื่องจากความเร่งของรถยนต์เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงระดับของการสิ้นสะท้อนหรือความสะดักสะบวยในการขับขี่ ในขณะที่ ระยะการสปริงตัวของยางเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความ สามารถในการควบคุมการขับขี่ ส่วนระยะชัก ระบบรองรับการสิ้นสะท้อนจะเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงค่าคงที่ที่เหมาะสมในออกแบบระบบรองรับการ

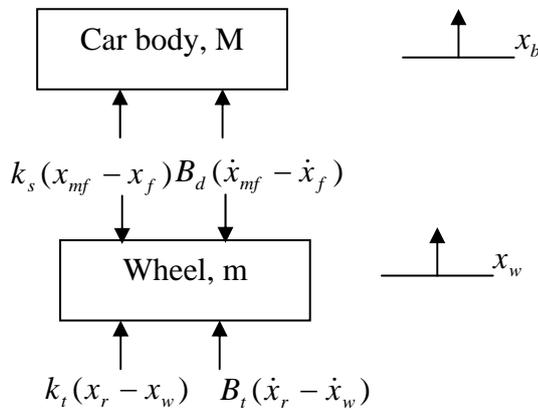
สันสะท้อน (Design Constant) ทั้งนี้เพราะระยะชักของระบบรองรับการสันสะท้อนถูกจำกัดโดยช่องว่าง (work space) ที่มีอยู่ระหว่างตัวรถยนต์และคัมล้อ

จากแบบจำลองระบบรองรับการสันสะท้อนชนิดล้อเดี่ยว ดังภาพที่ 6 พบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ตามแนวตั้งเท่านั้นยังไม่สามารถที่จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ตามแนวอื่น ๆ และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ทั้งคัน



ภาพที่ 6 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของระบบรองรับการสันสะท้อนชนิดล้อเดี่ยว

จากแบบจำลองในภาพที่ 6 สามารถเขียนเป็นผังวงจรถือสระได้ดังนี้

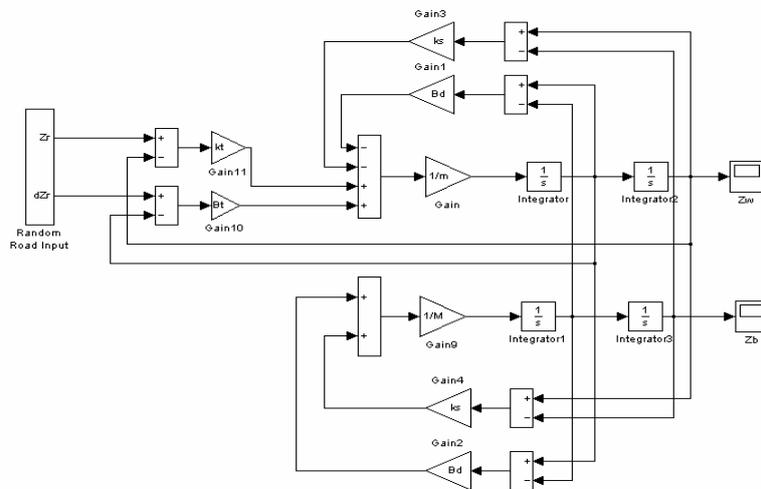


ภาพที่ 7 แผนผังอิสรระของเคลื่อนที่ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อเดี่ยว

จากแผนผังอิสรระดังภาพที่ 7 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟ (Passive Suspension) ได้ดังนี้

$$k_s(Z_w - Z_b) + B_d(\dot{Z}_w - \dot{Z}_b) = M\ddot{Z}_b \tag{1}$$

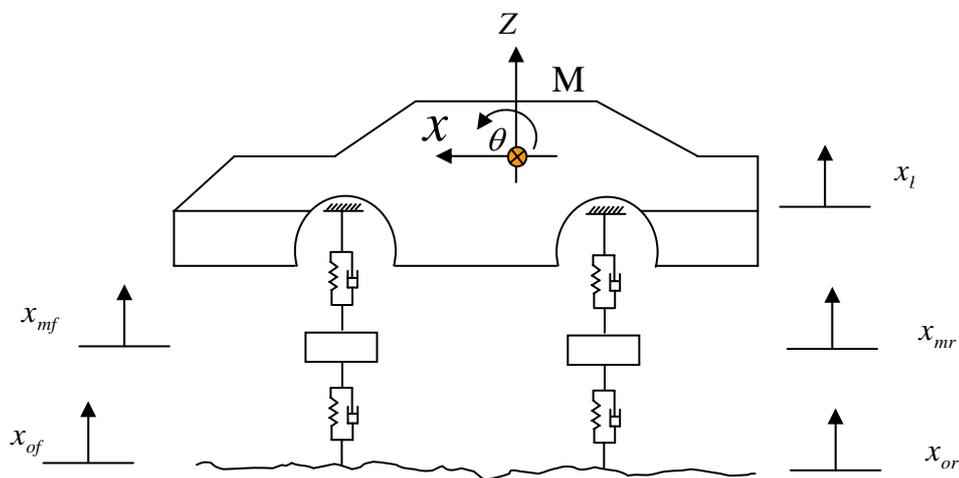
$$-k_s(Z_w - Z_b) - B_d(\dot{Z}_w - \dot{Z}_b) + k_t(Z_r - Z_w) + B_t(\dot{Z}_r - \dot{Z}_w) = m\ddot{Z}_w \tag{2}$$



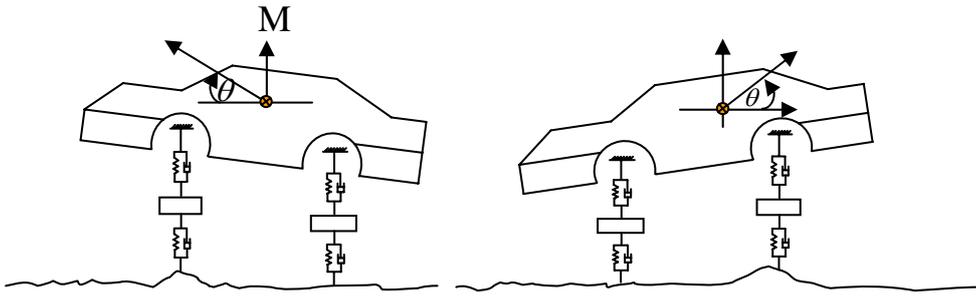
ภาพที่ 8 แบบจำลองของเคลื่อนที่ในแนวตั้งของระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อเดี่ยว

จากแบบจำลอง,แผนผังอิสระและสมการการเคลื่อนที่ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดล้อเดี่ยวดังภาพที่ 8 และ ระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชชีพข้างต้น จะพบว่าแบบจำลองข้างต้นเป็นเพียงตัวแทน 1/4 ของตัวรถ จะใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวตั้งเท่านั้น ไม่สามารถเป็นตัวแทนของการเคลื่อนที่ของรถทั้งคันและไม่สามารถที่จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมได้

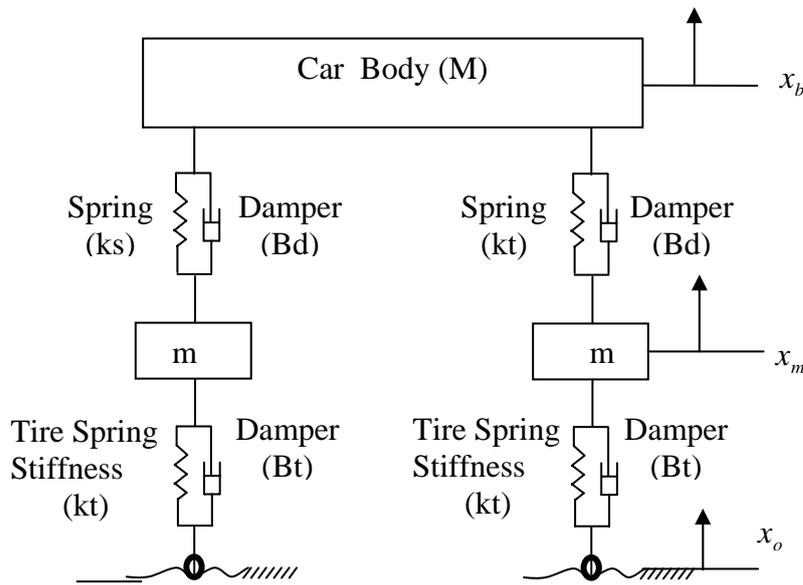
ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ และได้นำหลักการและวิธีการในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์มาช่วยอธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวโดยแบบจำลองของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ อันประกอบด้วย ก้อนน้ำหนัก M เป็นตัวแทนของน้ำหนักของรถยนต์ ก้อนน้ำหนัก (m) เป็นตัวแทนของน้ำหนักของล้อและระบบรองรับการสั่นสะเทือน ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างตัวรถและล้อ จะแทนด้วยสปริงเชิงเส้นที่มีค่าความแข็ง k_s และตัวหน่วงที่มีค่าคงที่ B_d จัดวางขนานกันทั้ง 4 ล้อ และด้วยหลักการเดียวกันล้อรถยนต์ก็ถูกแทนด้วยสปริงเชิงเส้นที่มีค่าคงที่ k_r และตัวหน่วงที่มีค่าคงที่ B_r โดยสมมติฐานที่ว่าระบบที่ศึกษาคือรถยนต์นั่งชนิด 4 ล้อ โดยการมองตลอดตามแนวยาวของรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วยชุดคู่อล้อหน้าและชุดคู่อล้อหลังและถือว่าล้อแต่ละคู่อมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กันดังภาพที่ 9-11



ภาพที่ 9 แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของรถยนต์ตามแนวระดับ

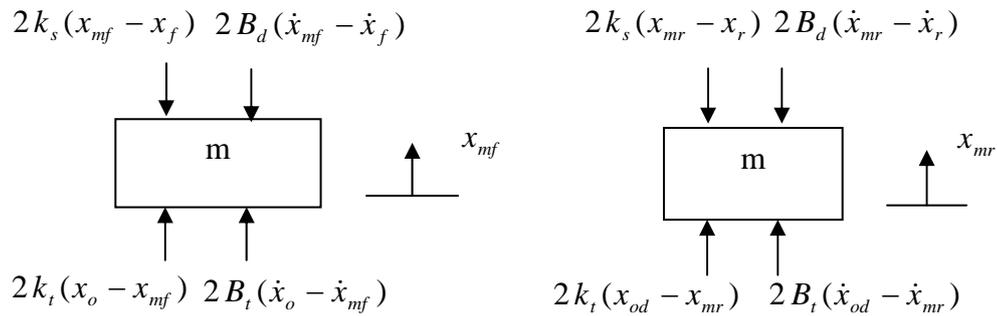


ภาพที่ 10 แบบจำลองของเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและการเคลื่อนที่แบบกระดกหัวและท้าย



ภาพที่ 11 แบบจำลองระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟชนิดเต็มคัน

จากรูปภาพของแบบจำลองข้างต้นเมื่อแยกพิจารณาเฉพาะล้อรถยนต์ทั้ง 2 ชุด คือชุดล้อหน้าและชุดล้อหลังสามารถเขียนผังวัตถุอิสระได้ดังนี้



เมื่อกำหนดให้

K_r	=	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพื้นถนนแบบสุ่ม
M	=	น้ำหนักที่ถูกรองรับด้วยสปริง (kg)
m	=	น้ำหนักที่ไม่ถูกรองรับด้วยสปริง (kg)
k_t	=	ค่าคงที่ของสปริงตัวของยาง (N/m)
B_t	=	ปริมาณการหน่วงของยางรถยนต์ (N/ms ⁻¹)
k_s	=	ค่าความแข็งของสปริง (N/m)
B_d	=	ปริมาณการหน่วงของโช้คอัพ (N/ms ⁻¹)
x_o	=	ระยะจัดสมบูรณ์ของถนนด้านหน้ารถ (m)
\dot{x}_o	=	ความเร็วของถนนด้านหน้ารถ (m/s)
x_{od}	=	ระยะจัดสมบูรณ์ของถนนด้านหลังรถ (m)
\dot{x}_{od}	=	ความเร็วของถนนด้านหลังรถ (m/s)
x_{mf}	=	ระยะจัดของล้อคู่หน้า (m)
\dot{x}_{mf}	=	ความเร็วของล้อคู่หน้า (m/s)
x_{mr}	=	ระยะจัดของล้อคู่หลัง (m)
\dot{x}_{mr}	=	ความเร็วของล้อคู่หลัง (m/s)
x_f	=	ระยะจัดของตัวรถยนต์ด้านหน้า (m)
\dot{x}_f	=	ความเร็วของตัวรถยนต์ด้านหน้า (m/s)
x_r	=	ระยะจัดของตัวรถยนต์ด้านหลัง (m)
\dot{x}_r	=	ความเร็วของตัวรถยนต์ด้านหลัง (m/s)
J	=	โมเมนต์ของความเฉื่อยตามแกน Y (kg-m ²)
l_1	=	ความยาวจากด้านหน้ารถถึงจุดศูนย์กลางมวล (m)

l_2	=	ความยาวจากท้ายรถถึงจุดศูนย์กลางมวล (m)
l	=	ความยาวของตัวรถยนต์ (m)
b	=	ความสูงของตัวรถยนต์ (m)
$x_o - x_{mf}$	=	ระยะสปริงตัวของยาง (m)
$x_{mf} - x$	=	ระยะชักของโช้คอัพ (m)
d_{2x}	=	ความเร่งของตัวรถยนต์ (m/s)

สมการการเคลื่อนที่ของระบบ รองรับภาระสันสะท้อนแบบแพชซีฟ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

สำหรับล้อคู่หน้า

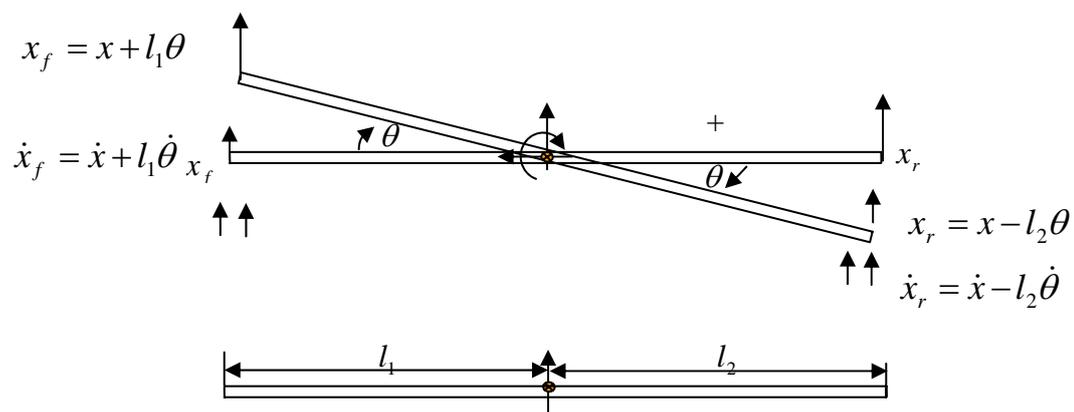
$$2k_t(x_o - x_{mf}) + 2B_t(\dot{x}_o - \dot{x}_{mf}) - 2k_s(x_{mf} - x_f) - 2B_d(\dot{x}_{mf} - \dot{x}_f) = m\ddot{x}_{mf} \quad (1)$$

สำหรับล้อคู่หลัง

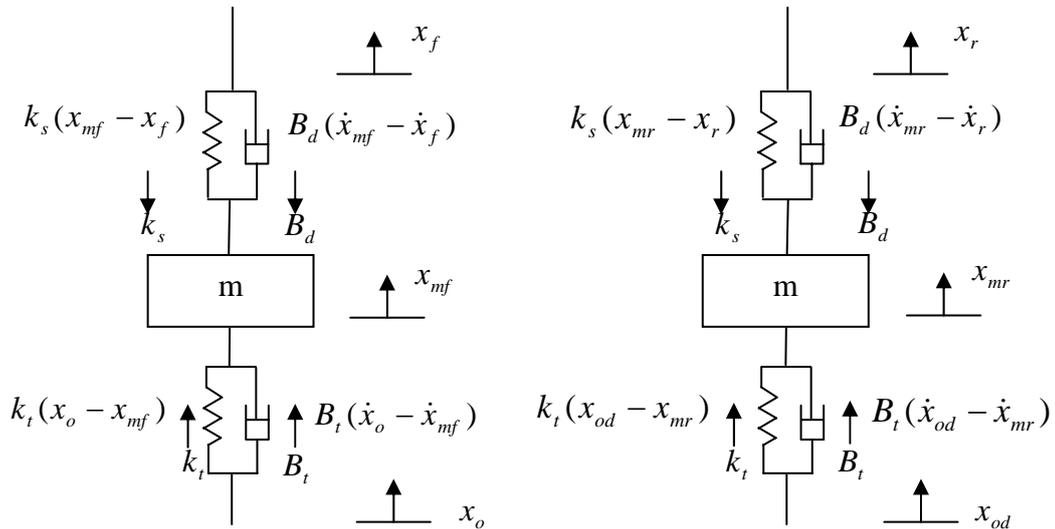
$$2k_t(x_{od} - x_{mr}) + 2B_t(\dot{x}_{od} - \dot{x}_{mr}) - 2k_s(x_{mr} - x_r) - 2B_d(\dot{x}_{mr} - \dot{x}_r) = m\ddot{x}_{mr} \quad (2)$$

ในสภาพความเป็นจริงของการขับขี่จะพบว่ารถยนต์ไม่ได้เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพียงแนวเดียวเท่านั้น รถยนต์ยังมีการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมด้วย ดังนั้นระยะชักของรถยนต์ที่เคลื่อนที่ไปในแนวตั้งและแนวเชิงมุม จึงสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$x_f = x + l_1\theta$ และ $x_r = x - l_2\theta$ เขียนเป็นฟังก์ชันของตัวรถยนต์ได้ดังนี้



หากพิจารณาฝั่งอิสระของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวเชิงมุมของล้อหน้าและล้อหลัง
ร่วมกันจะได้ดังนี้



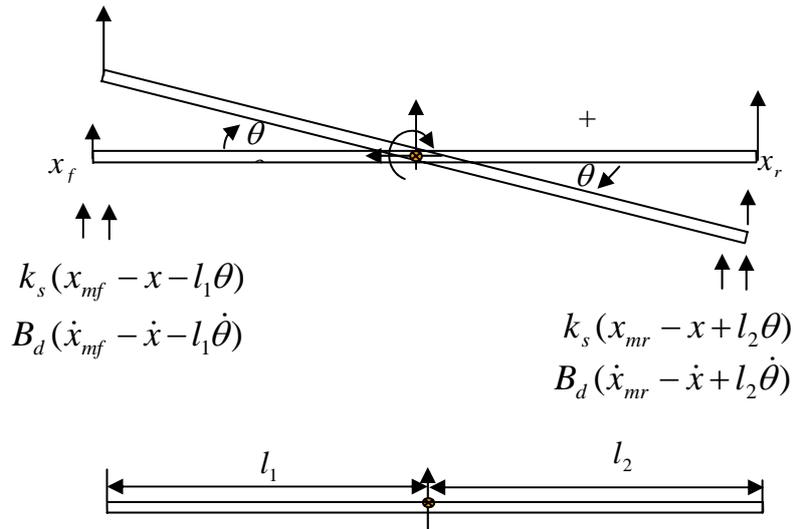
สำหรับล้อคู่หน้า

$$2k_t(x_o - x_{mf}) + 2B_t(\dot{x}_o - \dot{x}_{mf}) - 2k_s(x_{mf} - x - l_1\theta) - 2B_d(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) = m\ddot{x}_{mf} \quad (3)$$

สำหรับล้อคู่หลัง

$$2k_t(x_{od} - x_{mr}) + 2B_t(\dot{x}_{od} - \dot{x}_{mr}) - 2k_s(x_{mr} - x + l_2\theta) - 2B_d(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = m\ddot{x}_{mr} \quad (4)$$

พิจารณาที่ตัวรถยนต์หรือส่วนของน้ำหนักที่ถูกรองรับด้วยสปริง(Sprung Mass)
หากพิจารณาแรงทั้งหมดที่กระทำต่อตัวรถยนต์ในแนวตั้งและแนวเชิงมุมโดยในที่นี้ให้ล้อคู่หน้าถูก
กระตุ้นด้วยการวิ่งผ่านไปบนเนินพร้อมๆกันดังฝั่งอิสระและสมการดังนี้



สมการการเคลื่อนที่ของตัวรถยนต์ในแนวตั้งและแนวเชิงมุม

$$\begin{aligned}
 & k_s(x_{mf} - x - l_1\theta) + k_s(x_{mr} - x + l_2\theta) \\
 & + B_d(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) + B_d(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = M\ddot{x}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 & k_sl_1(x_{mf} - x - l_1\theta) - k_sl_2(x_{mr} - x + l_2\theta) \\
 & + B_dl_1(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) - B_dl_2(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = J\ddot{\theta}
 \end{aligned} \tag{6}$$

สมการข้างต้นนำมาเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกันด้วยสัญญาณที่ส่งต่อเนื่องอันประกอบด้วยแบบจำลอง 5 กลุ่มหลัก ดังภาพที่ 12 ได้แก่

1. แบบจำลองซึ่งเป็นตัวแทนของอินพุทถนนแบบสุ่ม
2. แบบจำลองพฤติกรรมของล้อคู่หน้า
3. แบบจำลองพฤติกรรมของล้อคู่หลัง
4. แบบจำลองพฤติกรรมในแนวตั้งของตัวรถยนต์
5. แบบจำลองพฤติกรรมในแนวเชิงมุมของตัวรถยนต์

จก Differential Equations

$$2k_t(x_o - x_{mf}) + 2B_t(\dot{x}_o - \dot{x}_{mf}) - 2k_s(x_{mf} - x - l_1\theta) - 2B_d(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) = m\ddot{x}_{mf}$$

$$2k_t(x_{od} - x_{mr}) + 2B_t(\dot{x}_{od} - \dot{x}_{mr}) - 2k_s(x_{mr} - x + l_2\theta) - 2B_d(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = m\ddot{x}_{mr}$$

$$k_s(x_{mf} - x - l_1\theta) + k_s(x_{mr} - x + l_2\theta) + B_d(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) + B_d(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = M\ddot{x}$$

$$k_sl_1(x_{mf} - x - l_1\theta) - k_sl_2(x_{mr} - x + l_2\theta) + B_dl_1(\dot{x}_{mf} - \dot{x} - l_1\dot{\theta}) - B_dl_2(\dot{x}_{mr} - \dot{x} + l_2\dot{\theta}) = J\ddot{\theta}$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบ First Order ของ State Variables

$$\dot{x}_{mf} = 0 + \dot{x}_{mf} + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$\ddot{x}_{mf} = \left(\frac{-2(k_t + k_s)}{m}\right)x_{mf} + \left(\frac{-2(B_t + B_d)}{m}\right)\dot{x}_{mf} + 0 + 0 + \left(\frac{2k_s}{m}\right)x + \left(\frac{2B_d}{m}\right)\dot{x} + \left(\frac{2k_sl_1}{m}\right)\theta + \left(\frac{2B_dl_1}{m}\right)\dot{\theta} + \left(\frac{2k_t}{m}\right)x_o + \left(\frac{2B_t}{m}\right)\dot{x}_o + 0 + 0$$

$$\dot{x}_{mr} = 0 + 0 + 0 + \dot{x}_{mr} + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$\ddot{x}_{mr} = 0 + 0 + \left(\frac{-2(k_t + k_s)}{m} \right) x_{mr} + \left(\frac{-2(B_t + B_d)}{m} \right) \dot{x}_{mr} + \left(\frac{2k_s}{m} \right) x + \left(\frac{2B_d}{m} \right) \dot{x} + \left(\frac{-2k_s l_2}{m} \right) \theta + \left(\frac{-2B_d l_2}{m} \right) \dot{\theta} + 0 + 0 + \left(\frac{2k_t}{m} \right) x_{od} + \left(\frac{2B_t}{m} \right) \dot{x}_{od}$$

$$\dot{x} = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + \dot{x} + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$\ddot{x} = \left(\frac{k_s}{M} \right) x_{mf} + \left(\frac{B_d}{M} \right) \dot{x}_{mf} + \left(\frac{k_s}{M} \right) x_{mr} + \left(\frac{B_d}{M} \right) \dot{x}_{mr} + \left(\frac{-2k_s}{M} \right) x + \left(\frac{-2B_d}{M} \right) \dot{x} + \left(\frac{-k_s l_1 + k_s l_2}{M} \right) \theta + \left(\frac{-B_d l_1 + B_d l_2}{M} \right) \dot{\theta} + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$\dot{\theta} = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + \dot{\theta} + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{k_s l_1}{J} \right) x_{mf} + \left(\frac{B_d l_1}{J} \right) \dot{x}_{mf} + \left(\frac{-k_s l_2}{J} \right) x_{mr} + \left(\frac{-B_d l_2}{J} \right) \dot{x}_{mr} + \left(\frac{-k_s l_1 + k_s l_2}{J} \right) x + \left(\frac{-B_d l_1 + B_d l_2}{J} \right) \dot{x} + \left(\frac{-k_s l_1^2 - k_s l_2^2}{J} \right) \theta + \left(\frac{-B_d l_1^2 - B_d l_2^2}{J} \right) \dot{\theta} + 0 + 0 + 0 + 0$$

หรือ ในรูปแบบของ State Space Form $\dot{x} = Ax + Bu$ เมื่อ

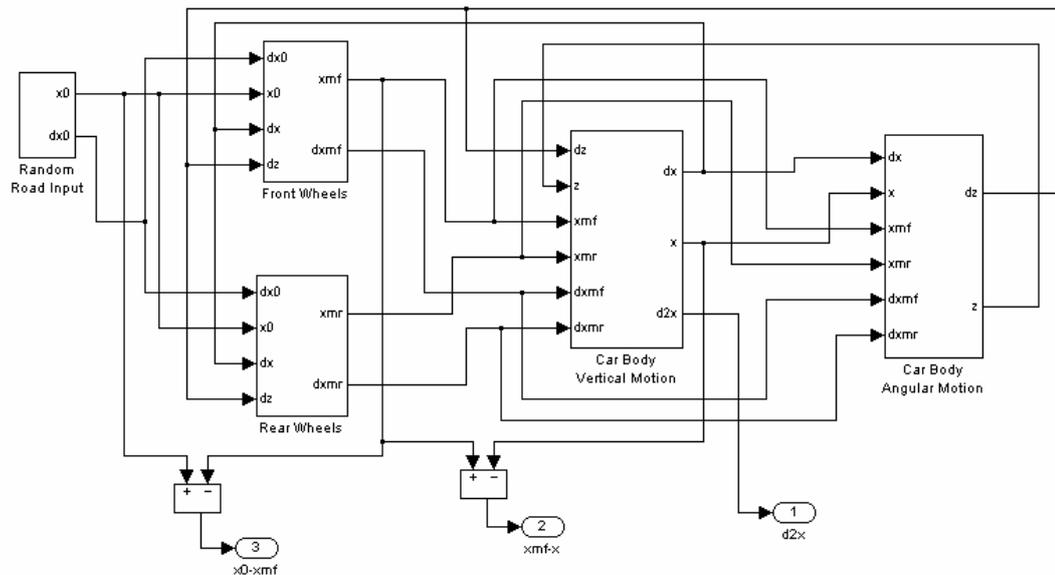
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{-2(k_t + k_s)}{m}\right) & \left(\frac{-2(B_t + B_d)}{m}\right) & 0 & 0 & \left(\frac{2k_s}{m}\right) & \left(\frac{2B_d}{m}\right) & \left(\frac{2k_s l_1}{m}\right) & \left(\frac{2B_d l_1}{m}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{-2(k_t + k_s)}{m}\right) & \left(\frac{-2(B_t + B_d)}{m}\right) & \left(\frac{2k_s}{m}\right) & \left(\frac{2B_d}{m}\right) & \left(\frac{-2k_s l_2}{m}\right) & \left(\frac{-2B_d l_2}{m}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{k_s}{M}\right) & \left(\frac{B_d}{M}\right) & \left(\frac{k_s}{M}\right) & \left(\frac{B_d}{M}\right) & \left(\frac{-2k_s}{M}\right) & \left(\frac{-2B_d}{M}\right) & \left(\frac{-k_s l_1 + k_s l_2}{M}\right) & \left(\frac{-B_d l_1 + B_d l_2}{M}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{k_s l_1}{J}\right) & \left(\frac{B_d l_1}{J}\right) & \left(\frac{-k_s l_2}{J}\right) & \left(\frac{-B_d l_2}{J}\right) & \left(\frac{-k_s l_1 + k_s l_2}{J}\right) & \left(\frac{-B_d l_1 + B_d l_2}{J}\right) & \left(\frac{-k_s l_1^2 - k_s l_2^2}{J}\right) & \left(\frac{-B_d l_1^2 - B_d l_2^2}{J}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{2k_t}{m}\right) & \left(\frac{2B_t}{m}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{2k_t}{m}\right) & \left(\frac{2B_t}{m}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_{mf} \\ \dot{x}_{mf} \\ x_{mr} \\ \dot{x}_{mr} \\ x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} x_o \\ \dot{x}_o \\ x_{od} \\ \dot{x}_{od} \end{bmatrix}$$

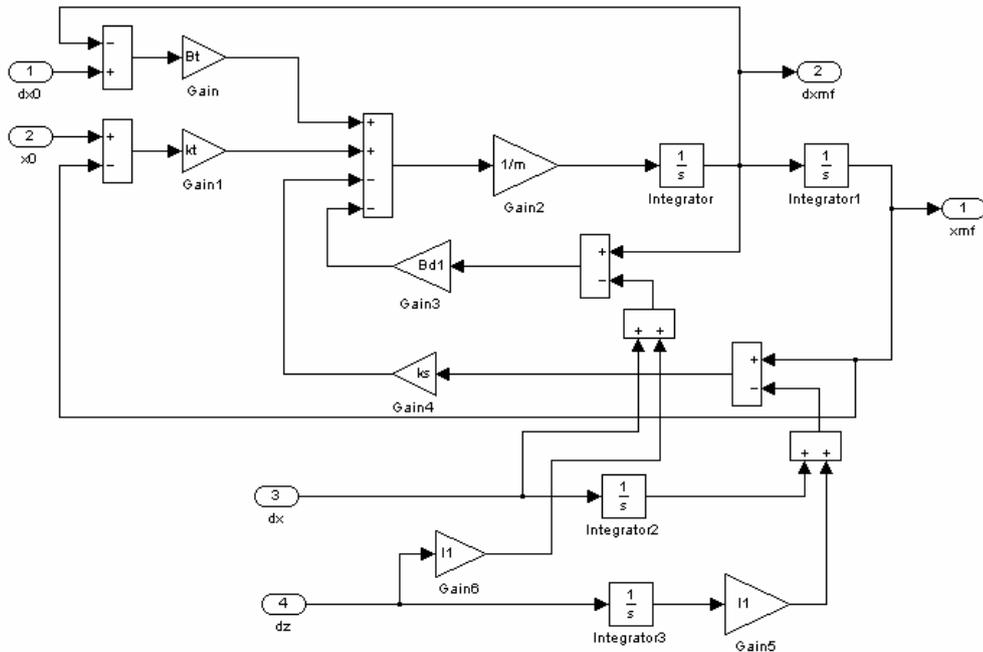
จากเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของตัวแปรข้างต้น ใช้วิธีแปลงรูปลาปลาซเพื่อหาคำตอบของสมการที่มีทั้งหมด 8 ตัวแปร ที่สภาวะเริ่มต้นตัวแปรมีค่าเป็นศูนย์ (Zero initially) โดยที่ $X_{mf}, X_{mr}, X, \theta$ คือระยะจัดในแนวดิ่งและแนวเชิงมุมจากสภาวะสมดุล ณ ระดับพื้นถนน จากนั้นจึงนำสมการดังกล่าวไปแก้ไขเพื่อหาคำตอบในโปรแกรม Matlab ต่อไป



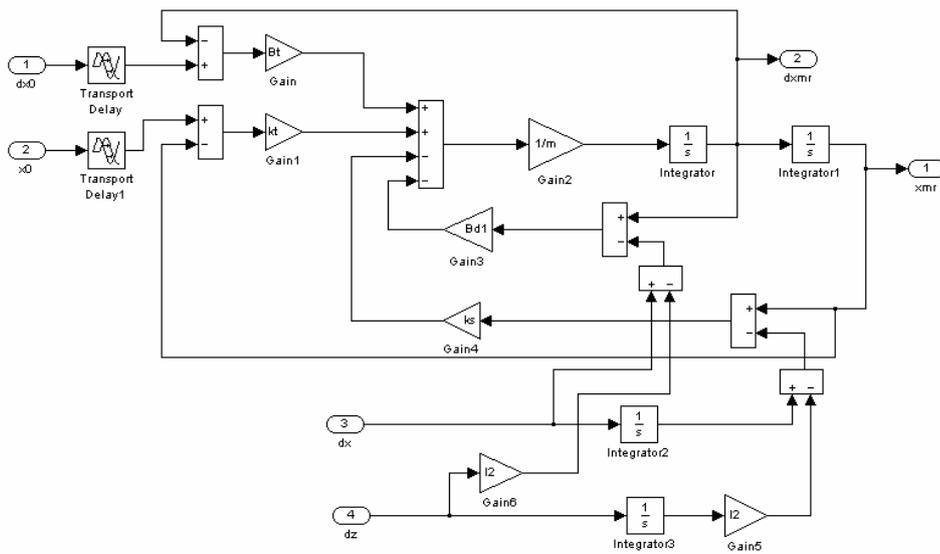
ภาพที่ 12 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์แบบในแนวดิ่งและแนวเชิงมุม

จากภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์นั่ง 4 ล้อดังภาพที่ 12 อินพุตจากถนนแบบสุ่มซึ่งเป็นตัวแทนของสภาพถนนจริงถูกใส่ให้กับระบบที่ล้อคู่หน้าและล้อคู่หลัง ตามลำดับ เพื่อเป็นการกระตุ้นระบบให้ทำงาน อินพุตจากถนนจะส่งผ่านเข้าสู่ล้อคู่หน้าและล้อคู่หลังในรูปของระยะจัดและความเร็ว โดยล้อคู่หลังถูกกระตุ้นหลังจากที่ล้อคู่หน้าถูกกระตุ้นแล้วและด้วยตัวหน่วงเวลา เมื่อล้อได้รับแรงกระทะหรือการกระตุ้นจะส่งผ่านแรงไปยังตัวรถยนต์เมื่อตัวรถยนต์ได้รับแรงกระทะจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวดิ่งและการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุม สำหรับเอาท์พุทที่เราสนใจจากระบบประกอบด้วย ความเร่งของรถยนต์ ระยะการจัดระบบรองรับการสั่นสะเทือนและระยะการสปริงของยางซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสามารถในการควบคุมการขับขี่และความสะดวกสบายในการขับขี่ โดยที่ความเร่งของรถยนต์บ่งชี้ถึงระดับการสั่นสะเทือนหรือความสบายในการขับขี่หรือการโดยสาร โดยขนาดของความเร่งจะแปรผกผันกับความสะดวกสบายในการขับขี่หรือการโดยสาร ส่วนระยะการสปริงตัวของยาง และระยะจัดของระบบรองรับการสั่นสะเทือนเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงขีดจำกัดของการออกแบบระยะห่างระหว่างตัวรถยนต์กับล้อ ส่วนระยะ

การสปริงตัวของยางที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการจับเกาะถนน(Road Holding) โดยที่ขนาดของการสปริงตัวของยางและระยะจัดของระบบรองรับการสั่นสะเทือนจะแปรผันตรงกับความสามารถในการจับเกาะถนน

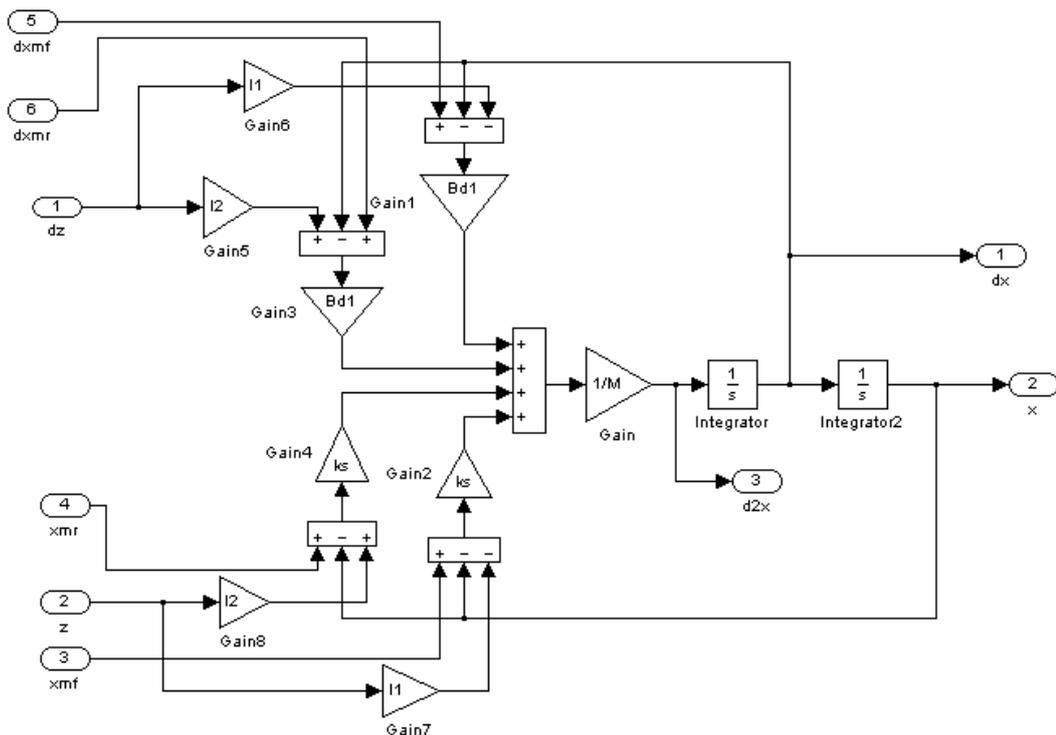


ภาพที่ 13 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์ในแนวตั้งของล้อคู่หน้า



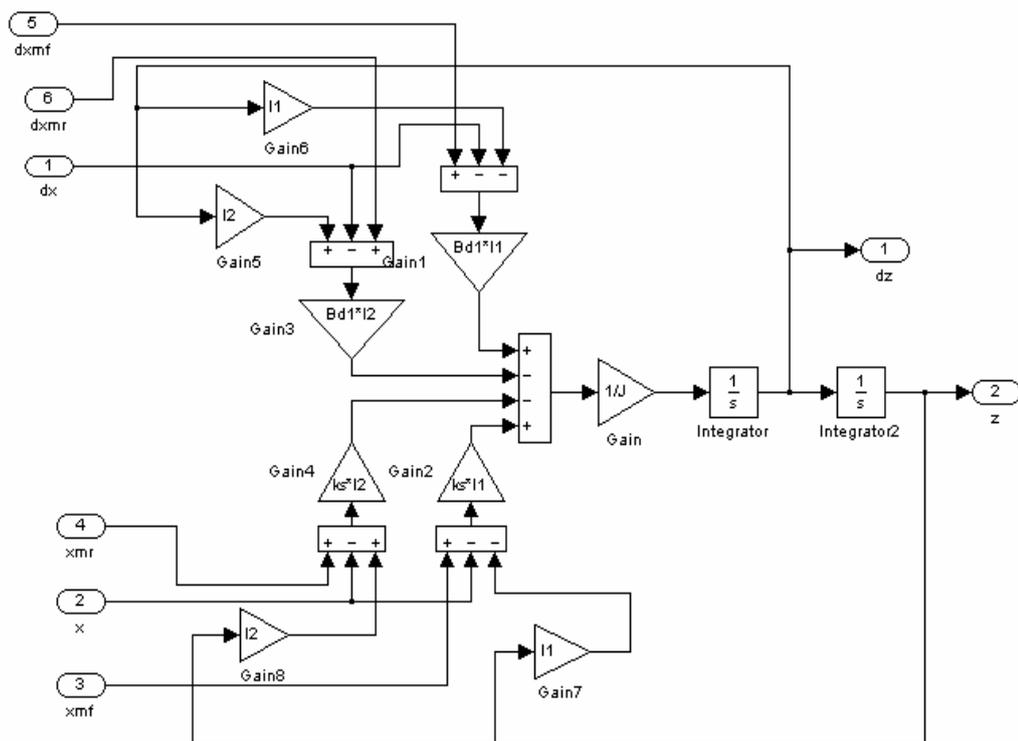
ภาพที่ 14 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์ในแนวตั้งของล้อคู่หลัง

เมื่อเราพิจารณาในแบบจำลองย่อยของล้อคู่หน้า ดังภาพที่ 13 จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความเชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมของล้อ ด้วยค่าคงที่ของยางและค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน โดยอินพุตที่เข้าสู่ระบบได้แก่ ความสูงของเนินบนถนน ความเร็วของเนินบนถนน และความเร็วของรถยนต์ ส่วนเอาต์พุตของระบบคือ ระยะขจัดของล้อและความเร็วของล้อ ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาแบบจำลองของล้อคู่หลังดังภาพที่ 14 เป็นแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 เช่นกัน โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความเชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมของล้อ ด้วยค่าคงที่ของยางรถยนต์และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน โดยอินพุตที่เข้าสู่ระบบได้แก่ ความสูงของเนินบนถนน ความเร็วของเนินบนถนน และความเร็วของรถยนต์ ความเร็วเชิงมุมของรถยนต์ ซึ่งจะถูกร่นเวลาหลังจากที่ล้อคู่หน้า ได้รับการกระตุ้นแล้วส่วนเอาต์พุตของระบบคือ ระยะขจัดของล้อและความเร็วของล้อ



ภาพที่ 15 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์ในแนวตั้งของตัวรถยนต์

เมื่อเราพิจารณาในแบบจำลองของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวรถยนต์ ดังภาพที่ 15 จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความเชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมด้วย มวลของรถยนต์ ค่าคงที่ของสปริงและค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน โดยอินพุตที่เข้าสู่ระบบ ความเร็วของล้อคู่หน้าและล้อคู่หลัง ความเร็วเชิงมุมของรถยนต์ ระยะขจัดของล้อคู่หน้าและล้อคู่หลัง และระยะขจัดเชิงมุมของรถยนต์



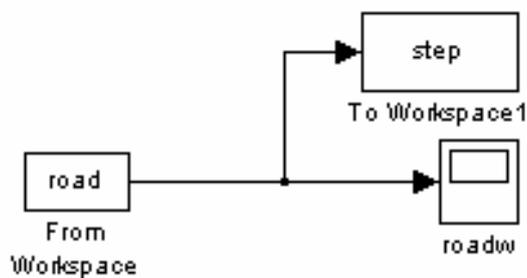
ภาพที่ 16 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์ในแนวเชิงมุมของตัวรถยนต์

เมื่อเราพิจารณาในแบบจำลองของการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมของตัวรถยนต์ ดังภาพที่ 16 จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่มีลำดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความเชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมด้วย โมเมนตัมความเฉื่อยของรถยนต์ ค่าคงที่ของสปริงและค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน โดยอินพุตที่เข้าสู่ระบบ ความเร็วของล้อคู่หน้าและล้อคู่หลัง ความเร็วของตัวรถยนต์ ระยะขจัดของล้อคู่หน้าและล้อคู่หลัง

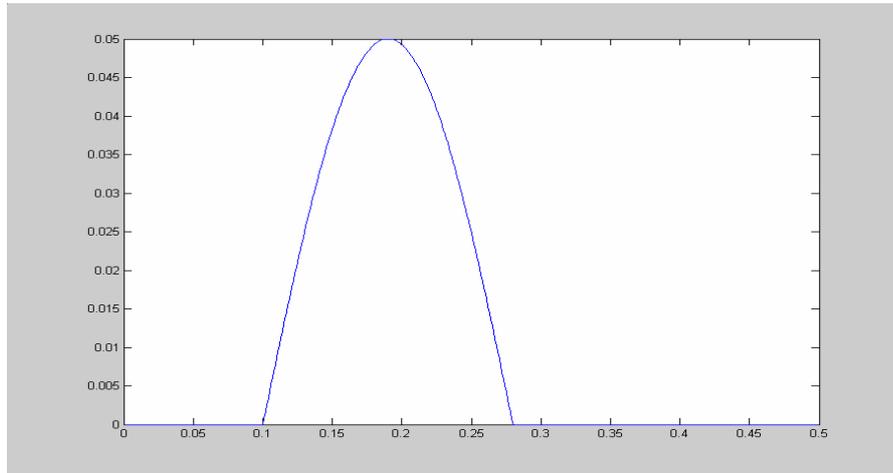
และระยะขจัดของรถยนต์ ส่วนเอาพุทของระบบได้แก่ ระยะขจัดเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมของตัวรถยนต์

1. แบบจำลองพื้นถนน

ความสามารถในการควบคุมการขับขี่ได้รับอิทธิพลจากอินพุทที่มาจากพื้นถนน ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลตอบสนองในทางพลศาสตร์ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์จึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่เหมาะสมของอินพุทที่มาจากพื้นถนน สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้อินพุทจากพื้นถนนในแบบที่ละจั่นและพื้นถนนแบบสุ่ม(Random road) อินพุทแบบที่ละจั่นจะใช้เป็นตัวแทนของสภาวะถนนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เช่น ในกรณีที่ล้อรถต้องประสบกับพื้นถนนที่เป็นเนินที่ชัน หรือตกหลุม ในขณะที่อินพุทแบบสุ่มจะใช้เป็นตัวแทนของสภาวะพื้นถนนที่มีความขรุขระอย่างต่อเนื่อง ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างดังกล่าว เราจึงสร้างแบบจำลองของตัวอย่างถนนแบบที่ละจั่นดังภาพข้างล่างเพื่อใส่เป็นอินพุทให้กับระบบดังภาพที่ 17-18



ภาพที่ 17 แผนผังแบบจำลองของพื้นถนนแบบที่ละจั่น(Step)

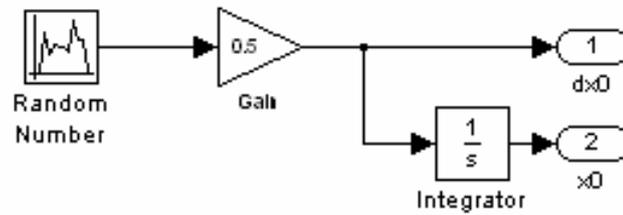


ภาพที่ 18 อินพุตพื้นถนนแบบทีละชั้น (Road input)

สำหรับการหาอินพุตแบบสุ่มนั้นได้เป็นที่สนใจในงานวิจัยมาเป็นเวลาหลายปีและได้มีการตรวจวัดลักษณะของพื้นถนนตามสถานที่ต่างๆ และได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ในเชิงสถิติและในเชิงพลศาสตร์โดยการใช้เทคนิคฟูเรียร์(Fourier) ซึ่งให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปของความหนาแน่นของสเปกตัม(Power Spectral Density) ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในวงการวิจัยว่ารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับอินพุตแบบสุ่มที่มาจากความขรุขระของพื้นถนน คือ ผลการอินทิเกรตของสัญญาณขาว (Intergrated White Noise) โดยผลลัพธ์อยู่ในรูปแบบของ(Power Spectral Density) การอินทิเกรตของสัญญาณขาวสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

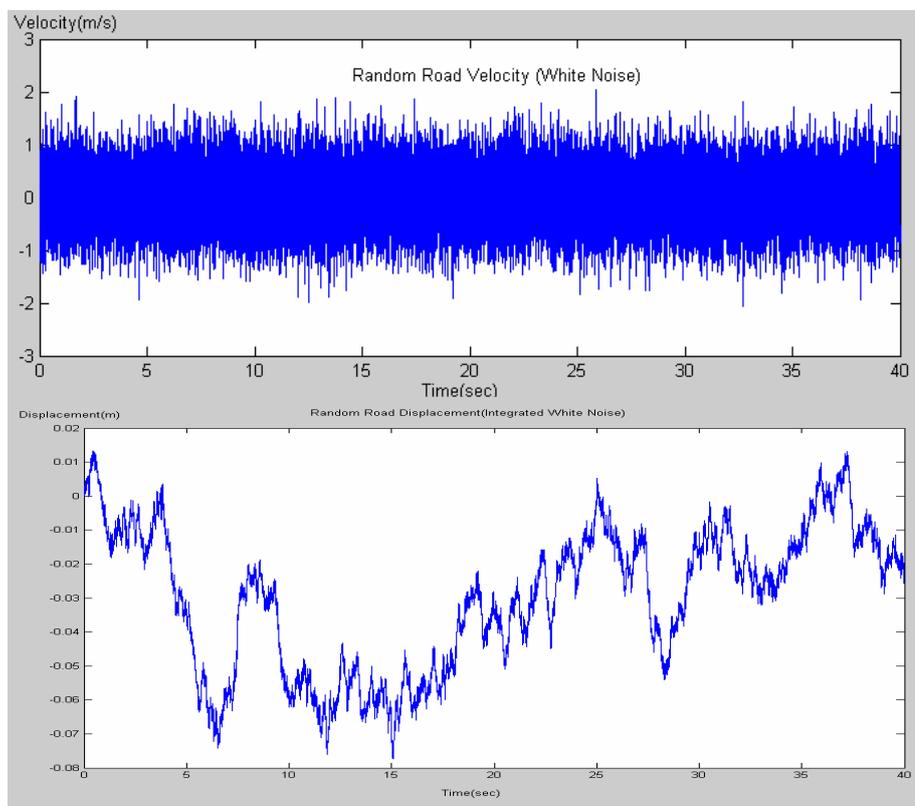
$$G_r(s) = \frac{K_r}{S}$$

เมื่อ K_r คือค่าคงที่ ที่พิจารณาจากความหนาแน่นของสัญญาณขาวและค่าคงที่ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นถนนและความเร็วของรถยนต์ ค่า K_r สำหรับการวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.5 และผลจากการอินทิเกรต สัญญาณขาวดังภาพที่ 19 จะได้ผลลัพธ์ คือ ความเร็วของตัวรถยนต์และระยะขจัดซึ่งจะเป็นอินพุตของระบบต่อไป



ภาพที่ 19 แบบจำลองของพื้นถนนแบบสุ่ม

เหตุผลที่เลือกใช้พื้นถนนแบบสุ่ม คือ พื้นถนนแบบสุ่มมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ (Optimum Design) เนื่องจากระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่ดีต้องสามารถที่จะลดระดับของการสั่นสะเทือนได้ในช่วงที่ความถี่ที่กว้างนอกจากนี้การเลือกใช้พื้นถนนแบบสุ่มที่เหมือนกันทำให้เราสามารถประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างค่าการสปริงตัวของยางและปริมาณการหน่วงที่แตกต่างกันได้



ภาพที่ 20 ความเร็วและระยะขจัดสัมบูรณ์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองพื้นถนนแบบสุ่ม

สำหรับสภาพของพื้นผิวถนนที่พบได้บ่อยในชีวิตประจำวัน เราพอจะแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. ถนนลาดยาง
2. ถนนคอนกรีต
3. ถนนดินลูกรัง



ภาพที่ 21 ถนนลาดยางภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน



ภาพที่ 22 ถนนคอนกรีตเส้นทางเลียบริมคลอง 2 ปทุมธานี



ภาพที่ 23 ถนนลูกรัง



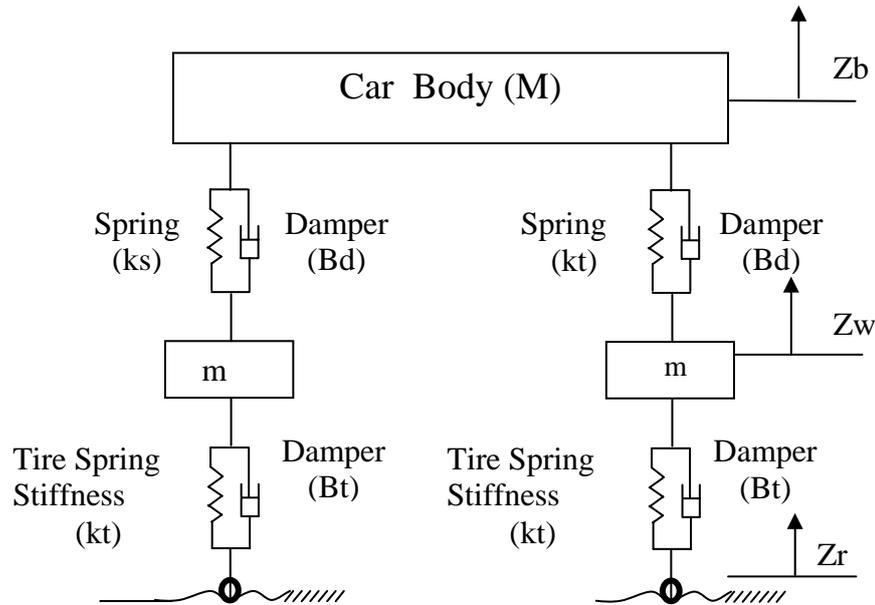
ภาพที่ 24 ตัวอย่างที่ 1 ของสภาพผิวการจราจรที่ขรุขระ



ภาพที่ 25 ตัวอย่างที่ 2 ของสภาพผิวการจราจรที่ขรุขระ

หากจะพิจารณาถึงเหตุผลที่เลือกใช้แบบจำลองของรถยนต์ชนิดเต็มคัน แทนแบบจำลองรถยนต์ชนิดล้อเดียว จะพบว่าเนื่องจากในสภาพการขับขี่จริงบนถนนนั้น แรงที่กระทำต่อล้อคู่หน้า

จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของล้อหลังและแรงที่กระทำต่อล้อคู่หน้าและล้อคู่หลังจะส่งผลกระทบต่อตัวรถยนต์ทั้งในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมและในที่สุดก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการขับขี่และความสะดวกสบายในการขับขี่ ซึ่งมักเกิดขึ้นในสภาพของการขับขี่บนถนนจริงมากกว่า



ภาพที่ 26 แบบจำลองของเคลื่อนที่ของรถยนต์ชนิดเต็มคัน

2. ค่าคงที่ต่างๆที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. น้ำหนักของล้อแต่ละล้อ มีค่าเท่ากับ 40 kg
2. ค่าการหน่วงของยาง มีค่าเท่ากับ 500 N/ms^{-1}
3. ค่าความยาวจากด้านหน้ารถมาถึงจุดศูนย์กลางมวลเท่ากับ 1 เมตร
4. ค่าความยาวจากด้านหลังรถมาถึงจุดศูนย์กลางมวลเท่ากับ 1.5 เมตร
5. ค่าคงที่โมเมนต์ของความเฉื่อย(Momentum of inertia) เท่ากับ $1,500 \text{ kg-m}^2$

6. ค่าคงที่ของถนนแบบคู่ $K_r = 0.5$
7. น้ำหนักของรถยนต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 1,000-1,700 kg
8. ค่าปริมาณการหน่วง มีค่าเท่ากับ 1,000-15,000 N/ms^{-1}
9. ค่าการสปริงตัวของยาง มีค่าระหว่าง 50,000-260,000 N/m ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ของ M , Bd และ kt ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในแต่ละกลุ่มการทดลองได้แสดงไว้ดังตาราง

น้ำหนักของรถยนต์ kg	ค่าการหน่วงสะระที่ถนนบรองรับ การสั่นสะเทือน N/ms^{-1}	ค่าคงที่ของยาง N/m
1,000	1,000	50,000
1,050	2,000	65,000
1,100	3,000	80,000
1,150	4,000	95,000
1,200	5,000	110,000
1,250	6,000	125,000
1,300	7,000	140,000
1,350	8,000	155,000
1,400	9,000	170,000
1,450	10,000	185,000
1,500	11,000	200,000
1,550	12,000	215,000
1,600	13,000	230,000
1,650	14,000	245,000
1,700	15,000	260,000

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่หรือทำการใส่อินพุทให้กับแบบจำลองที่เราสร้างขึ้นและทำการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงในระบบที่เกิดขึ้นจำนวน 3 ค่า ค่าคงที่ดังกล่าวได้แก่ มวลของรถยนต์ ค่าปริมาณการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน และค่าคงที่ของการสปริงตัวของยาง ดังต่อไปนี้

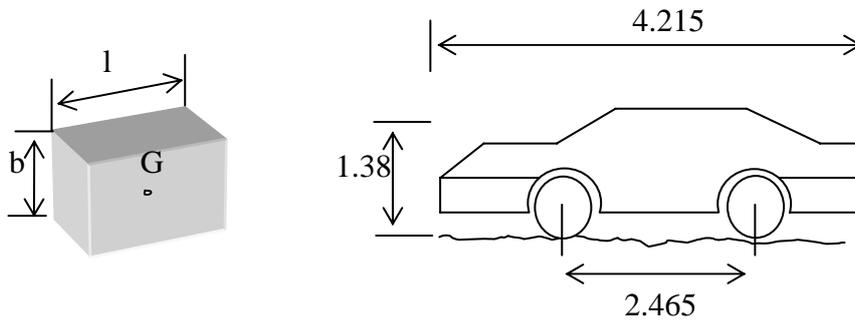
1. ในทุก ๆ ค่าน้ำหนักของรถยนต์จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนจำนวน 15 ค่า ซึ่งจะให้ค่า RMS ทั้งหมดจำนวน 225 ค่า โดยกำหนดให้ค่าคงที่ของการสปริงมีค่าคงที่ เท่ากับ $140,000 \text{ N/m}$

2. ในทุก ๆ ค่าน้ำหนักของรถยนต์ เราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของการ k , จำนวน 15 ค่า ซึ่งจะให้ค่า RMS ทั้งหมดจำนวน 225 ค่า โดยกำหนดให้ค่าการหน่วงของระบบรองรับการสะเทือนกับ $4,000 \text{ N/m}^{-1}$

3. ในทุก ๆ ค่าของ k , เราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของการหน่วงของระบบรองรับการสะเทือนจำนวน 15 ค่า ระบบรองรับการสะเทือน ซึ่งจะให้ค่า RMS ทั้งหมดจำนวน 225 ค่า โดยกำหนดให้น้ำหนักของรถยนต์มีค่าคงที่ เท่ากับ $1,250 \text{ kg}$

4. ในทุก ๆ ค่าของ k , เราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนัก จำนวน 15 ค่า ซึ่งจะให้ค่า RMS ทั้งหมดจำนวน 225 ค่า โดยกำหนดให้ค่าการหน่วงของระบบระบบรองรับการสะเทือน เท่ากับ $4,000 \text{ N/m}^{-1}$

สำหรับการหาค่า โมเมนต์ของความเฉื่อยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถหาได้จากก้อนวัตถุมวล M และสัดส่วนระหว่างความสูงและความยาวของวัตถุเท่ากับ 1: 4



ภาพที่ 27 โมเมนต์ความเฉื่อยของรถยนต์

จากสมการ

$$J = \frac{1}{12} M (b^2 + l^2)$$

เมื่อ $M = 1,250 \text{ kg}$

$b = 1 \text{ meter}$

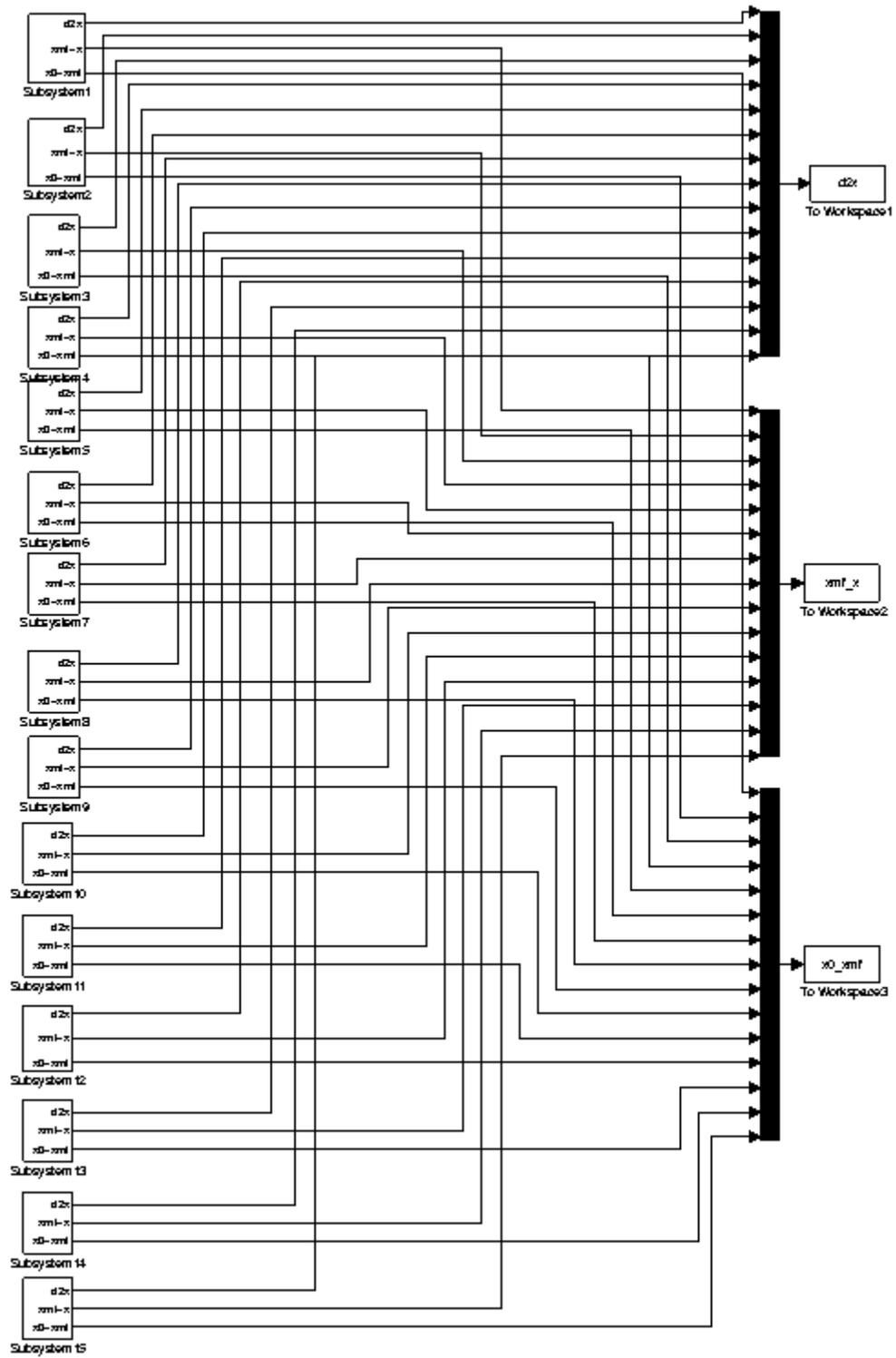
$l = 4 \text{ meter}$

แทนค่า

$$= \frac{1}{12} (1250)(1^2 + 4^2)$$

$$J = 1,667 \text{ kg} - \text{m}^2$$

หากเราพิจารณาแบบจำลองของการวิเคราะห์ความปลอดภัยในการขับขี้อยนต์นั่ง 4 ล้อ โดยใช้เทคนิคไดนามิกสปีดชัน จะพบว่า เราสามารถสร้างแบบจำลองโดยรวมของระบบที่ทำการศึกษา ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนี้

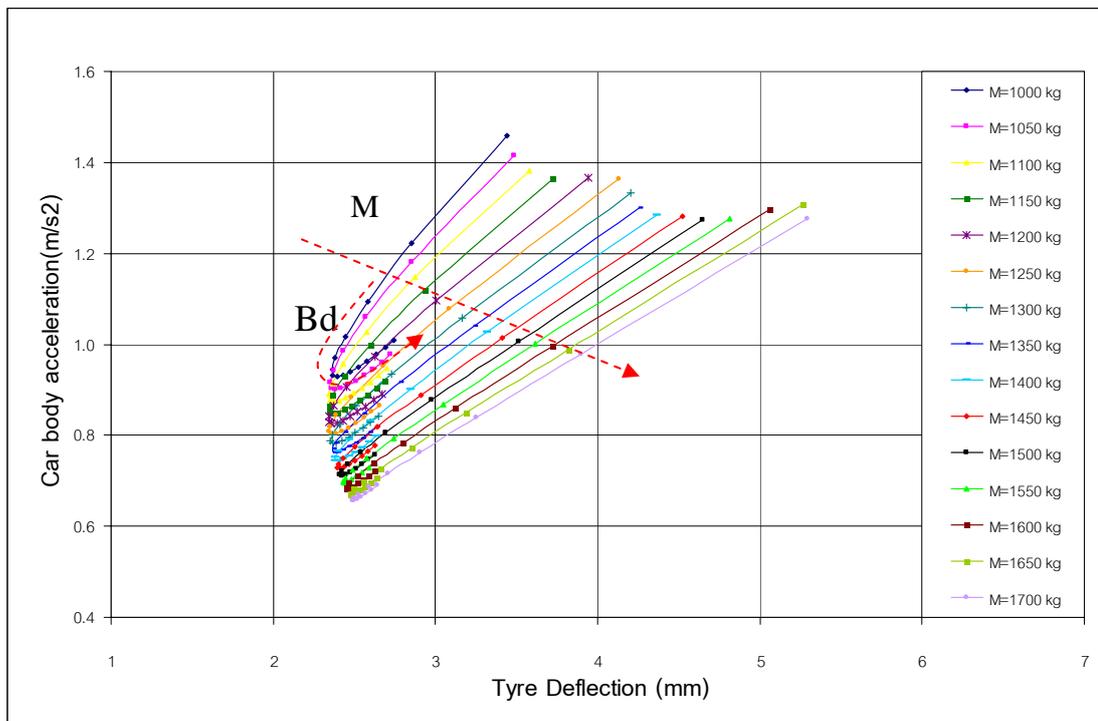


ภาพที่ 28 แผนผังแบบจำลองระบบรองรับการสั่งสะท้อนชนิดพลาตแพชชีฟ
ที่ประกอบด้วย 15 กลุ่มแบบจำลอง ใน 1 ชุดข้อมูล

ผลและวิจารณ์

1. ผลลัพธ์จากการทดลองโดยใช้อินพุตพื้นถนนแบบสุ่ม

จากการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่า M , k_s , B_d ให้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถสังเกตผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับระบบ ซึ่งผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ที่เราสนใจนั้นประกอบด้วย ความเร่งของตัวรถยนต์ (Car body Acceleration) ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน (Suspension Stroke Displacement) และระยะการสปริงตัวของยาง (Tyre deflection) ได้ถูกคำนวณและแสดงผลดังนี้



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสปริงตัวของยางและขนาดของความเร่งของตัวรถยนต์
เมื่อกำหนดให้ k_s คงที่

จากการจำลองสถานการณ์พบว่า หากพิจารณาโดยภาพรวมของน้ำหนักรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้

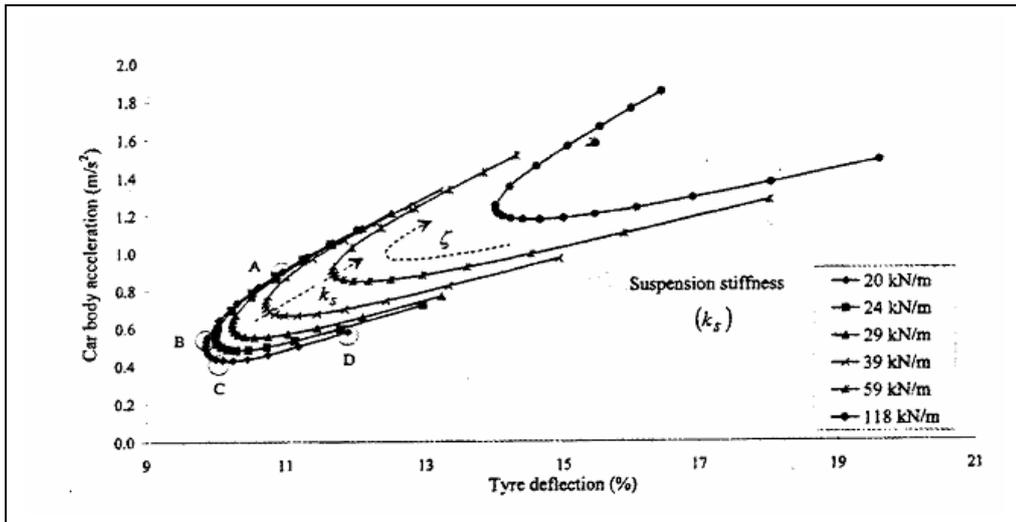
ค่าความเร่งของรถยนต์ลดต่ำลง
ระยะเวลาสปริงตัวของยาง เพิ่มขึ้น

จากภาพหากพิจารณาในแต่ละค่าน้ำหนักรถยนต์หรือเส้นโค้งอื่น ๆ ที่มีค่าน้ำหนักแตกต่างกันจะพบว่า ขณะที่ค่าการหน่วงของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีผลทำให้

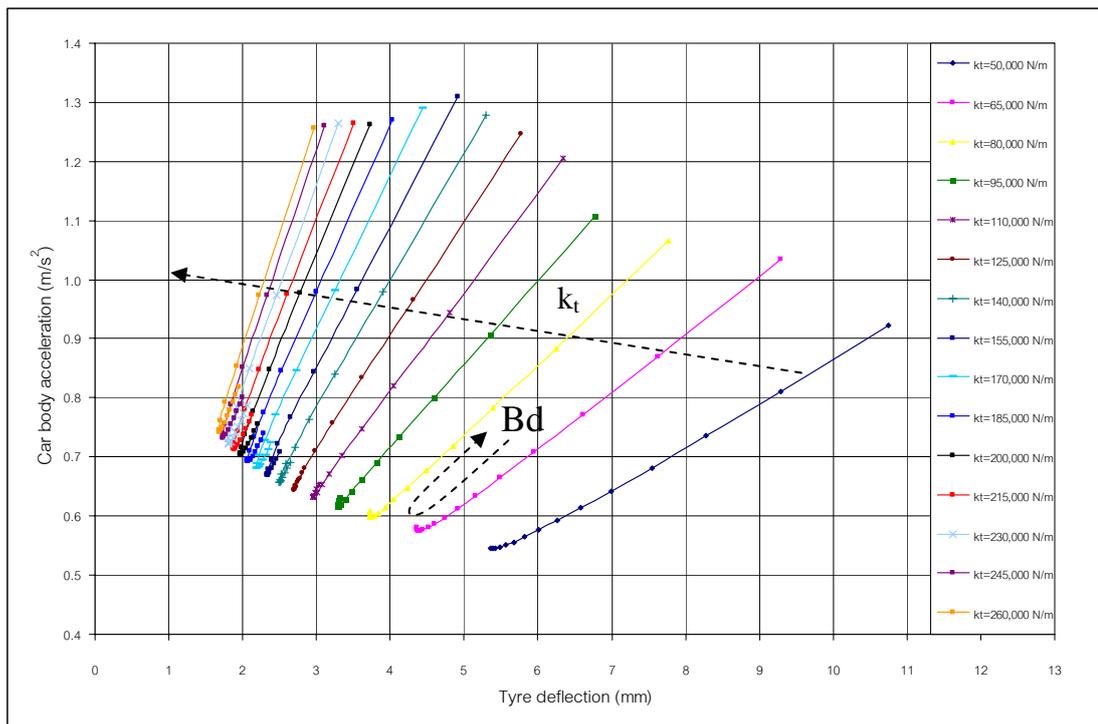
ขนาดความเร่งของรถยนต์และค่าระยะเวลาสปริงตัวของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก จนถึงจุด ๆ หนึ่งอันเป็นจุดที่แสดงถึงระดับต่ำสุดของความเร่งของรถยนต์ และระดับต่ำสุดของค่าระยะเวลาสปริงตัวของยางซึ่งเป็นจุดที่จะให้ค่าการหน่วงที่ดีที่สุดที่ทำให้ ความเร่งของรถยนต์และค่าของระยะเวลาสปริงตัวของยางมีค่าต่ำสุด

นั่นหมายความว่า คือจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบค่าน้ำหนักรถและค่าการหน่วงของระบบระยะเวลาสปริงตัวของยาง ระยะเวลาสปริงตัวของยางเพราะเป็นจุดที่มีความเร่งต่ำสุด อันจะทำให้เกิดความสะอึกสะอวดในการขับขี่ และเป็นจุดที่มีค่าระยะเวลาสปริงตัวของยาง มีค่าต่ำสุด อันจะทำให้ความสามารถในการจับเกาะถนน (Road Holding) มีประสิทธิภาพดีที่สุดในที่สุด

หากเรายังคงเพิ่มค่าการหน่วงให้ระบบการสั่นสะเทือนรับการสั่นสะเทือน ต่อไปอีก จากภาพกราฟจะแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและระยะเวลาสปริงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจะตรงข้ามกับผลงานวิจัยของประกอบ สุรวฒนาวรรณ (2545) ซึ่งได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟของรถยนต์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสปริงตัวของยางและขนาดของความเร่งของลำตัวรถยนต์ คือ การเพิ่มค่าการหน่วงขึ้นไปจนเลยค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบค่าที่เหมาะสมในการออกแบบจะพบว่ามีมีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและระยะเวลาสปริงตัวของยาง มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจากความชันของกราฟจะพบว่า ค่าการหน่วงที่สูงมีอิทธิพลทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของระยะเวลาสปริงตัวของยางพอ ๆ กับความเร่งของรถยนต์ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระยะสปริงตัวของยางและขนาดความเร่งของลำตัวรถยนต์



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสปริงตัวของยาง และขนาดของความเร่งของตัวรถยนต์
เมื่อกำหนด M คงที่

จากการจำลองสถานการณ์จะพบว่า หากพิจารณาโดยภาพรวมของค่า k_t ของยางที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้

ขนาดความเร่งของรถยนต์เพิ่มขึ้น
ค่าระยะการสปริงตัวของยาง ลดต่ำลง

จากภาพหากพิจารณาในแต่ละค่า k_t ของยางหรือเส้นโค้งอื่น ๆ ที่มีค่า k_t แตกต่างกันจะพบว่า ขณะที่ค่าการหน่วงของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีผลทำให้

ขนาดความเร่งของรถยนต์และค่า ระยะการสปริงตัวของยาง มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก จนถึงจุด ๆ หนึ่งอันเป็นจุดที่แสดงถึงระดับต่ำสุดของความเร่งของรถยนต์ และระดับต่ำสุดของค่า ระยะการสปริงตัวของยาง ซึ่งเป็นจุดที่จะให้ค่าการหน่วงที่ดีที่สุดที่ทำให้ ความเร่งของรถยนต์และค่าของ ระยะการสปริงตัวของยาง มีค่าต่ำสุด

นั่นหมายความว่า คือจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ(Optimum Design) ค่า k_t ของยางและค่าการหน่วงของระบบรองรับเพราะเป็นจุดที่มีความเร่งต่ำสุด อันจะทำให้เกิดความ สะดวกสบายในการขับขี่ และเป็นจุดที่มีค่า ระยะการสปริงตัวของยางมีค่าต่ำสุด อันจะทำให้ ความสามารถในการจับเกาะถนน (Road holding) มีประสิทธิภาพดีที่สุด

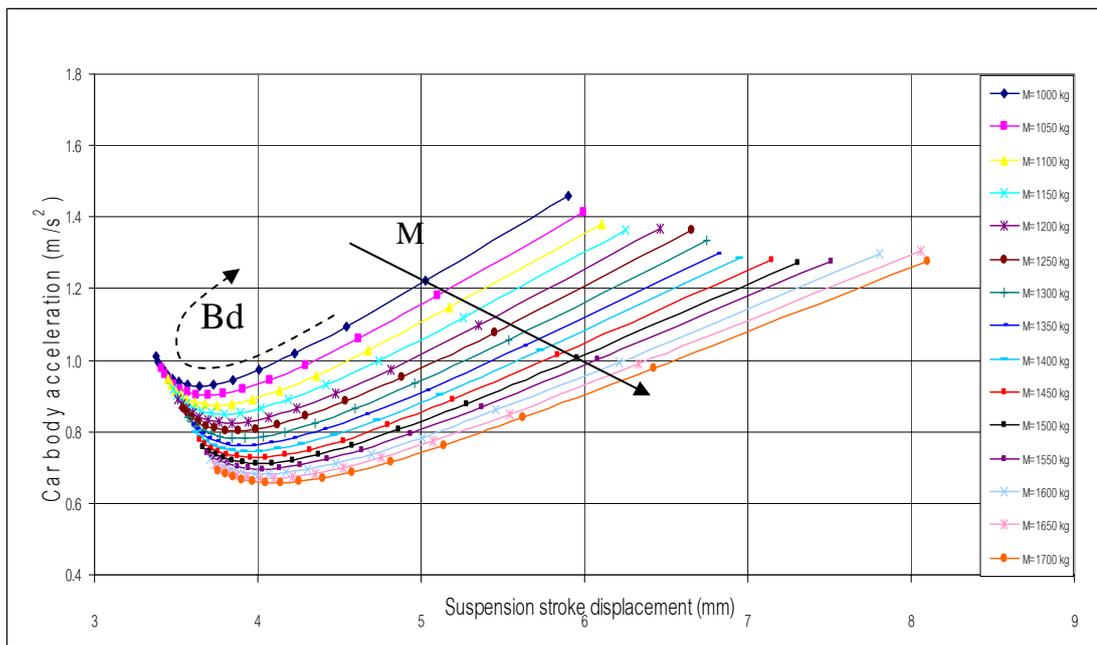
หากเรายังคงเพิ่มค่าการหน่วงให้ระบบรองรับสะท้อนในต่อไปอีก จากภาพกราฟจะแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและ ระยะการสปริงตัวของยางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

จากกราฟการจำลองสถานการณ์ยังพบสิ่งที่น่าสนใจอีกคือ

1. ช่วงของค่า k_t ที่อยู่ระหว่าง 50,000 – 125,000 N/m การเพิ่มค่าการหน่วงขึ้นไปจนเลยค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่ง ระยะการสปริงตัวของยางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ (2545) ซึ่งได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบแพชซีฟของรถยนต์ พบว่า ความสัมพันธ์

ระหว่างระยะการสปริงตัวของยางและขนาดของความเร่งของลำตัวรถยนต์ คือ การเพิ่มค่าการหน่วงขึ้นไปจนเลขค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและระยะการสปริงตัวของยางมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจากความชันของกราฟจะพบว่า ค่าการหน่วงที่สูงมีอิทธิพลทำให้เกิดการเพิ่มขนาดระยะการสปริงตัวของยาง มากกว่าความเร่งของรถยนต์ ดังภาพที่ 30

2. ช่วงของค่า k_t ที่อยู่ระหว่าง 140,000 – 260,000 N/m การเพิ่มค่าการหน่วงขึ้นไปจนเลขค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและระยะการสปริงตัวของยางมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจากความชันของกราฟจะพบว่า ค่าการหน่วงที่สูงมีอิทธิพลทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของความเร่งของรถยนต์ มากกว่าระยะการสปริงตัวของยาง



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนและขนาดของความเร่งของตัวรถยนต์ เมื่อกำหนดให้ k_t คงที่

จากการจำลองสถานการณ์ จะพบว่า หากพิจารณาโดยภาพรวมของน้ำหนักของรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้

ค่าความเร่งของรถยนต์ลดต่ำลง

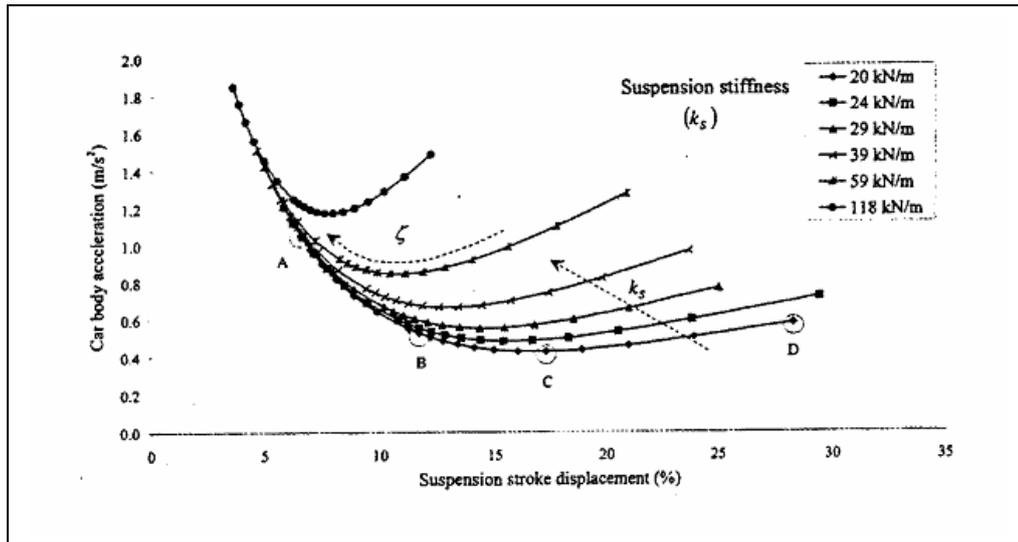
ค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น

จากภาพหากพิจารณาในแต่ละค่าน้ำหนักของรถยนต์หรือเส้นโค้งอื่น ๆ ที่มีค่าน้ำหนักแตกต่างกันจะพบว่า ขณะที่ค่าการหน่วงของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีผลทำให้

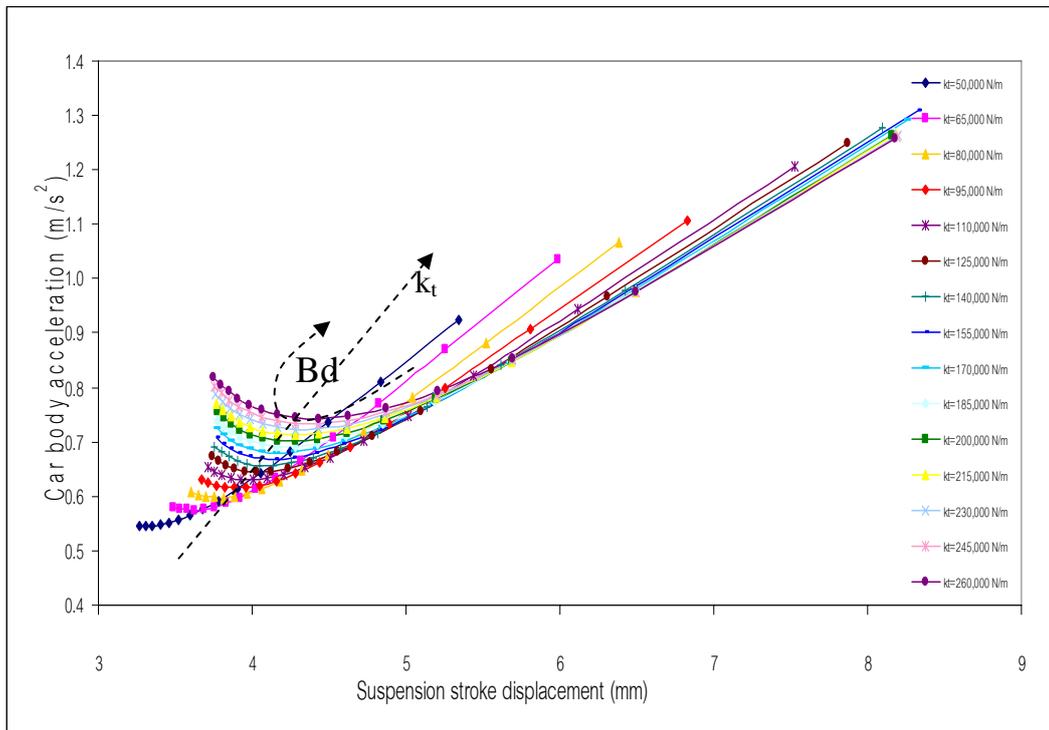
ขนาดความเร่งของรถยนต์และค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีแนวโน้มลดลงอย่างมากจนถึงจุด ๆ หนึ่งอันเป็นจุดที่แสดงถึงระดับต่ำสุดของความเร่งของรถยนต์ และระดับต่ำสุดของค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นจุดที่จะให้ค่าการหน่วงที่ดีที่สุดที่ทำให้ ความเร่งของรถยนต์และค่าของ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด

นั่นหมายความว่า คือจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบค่าน้ำหนักของรถและค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน เพราะเป็นจุดที่มีความเร่งต่ำสุด อันจะทำให้เกิดความสะดวกสบายในการขับขี่ และเป็นจุดที่มีค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด อันบ่งบอกถึงค่า(Design Constraint) ซึ่งถือว่าเป็นขีดจำกัดทางกายภาพของระบบเนื่องจากระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนถูกจำกัดโดยช่องว่าง (working space) ที่มีอยู่ระหว่างตัวรถยนต์และคัมล้อ

หากเรายังคงเพิ่มค่าการหน่วงให้ระบบรองรับการสั่นสะเทือนต่อไปอีก จากภาพกราฟจะแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ (2545) ซึ่งได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรองรับการสั่นสะเทือนชนิดแพชซีพของรถยนต์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระยะชักของรองรับการสั่นสะเทือนและขนาดของความเร่งของลำตัวรถยนต์ คือ การเพิ่มค่าการหน่วงขึ้นไปจนเลยค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ จะพบว่ามีเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและ ระยะการสปริงตัวของยางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจากความชันของกราฟจะพบว่า ค่าการหน่วงที่สูงมีอิทธิพลทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของความเร่งของรถยนต์ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะสปริงตัวของยางและขนาดความเร่งของลำตัวรถยนต์
ที่มา: ประกอบ (2545)



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะชักของระบบรองรับการขึ้นสะเทือนและขนาดของความเร่ง
ของตัวรถยนต์เมื่อกำหนด M คงที่

จากการจำลองสถานการณ์จะพบว่า หากพิจารณาโดยภาพรวมของค่า k_c ของยางที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้

ขนาดความเร่งของรถยนต์เพิ่มขึ้น
ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน

จากภาพหากพิจารณาในแต่ละค่า k_c ของยางหรือเส้นโค้งอื่น ๆ ที่มีค่า k_c แตกต่างกันจะพบว่า ขณะที่ค่าการหน่วงของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะมีผลทำให้

ขนาดความเร่งของรถยนต์และค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีแนวโน้มลดลงอย่างมากจนถึงจุด ๆ หนึ่งอันเป็นจุดที่แสดงถึงระดับต่ำสุดของความเร่งของรถยนต์ และระดับต่ำสุดของค่า ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นจุดที่จะให้ค่าการหน่วงที่ดีที่สุดที่ทำให้ ความเร่งของรถยนต์และค่าของ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด

นั่นหมายความว่า คือจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ ค่า k_c ของยางและค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนเพราะเป็นจุดที่มีความเร่งต่ำสุด อันจะทำให้เกิดความ สะดวกสบายในการขับขี่ และเป็นจุดที่มีค่าระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด อันบ่งบอกถึงค่าซึ่งถือว่าเป็นขีดจำกัดทางกายภาพของระบบเนื่องจากระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน ถูกจำกัดโดยช่องว่างที่มีอยู่ระหว่างตัวรถยนต์และคัมล้อ

หากเรายังคงเพิ่มค่าการหน่วงให้ระบบรองรับการสั่นสะเทือนต่อไปอีก จากภาพกราฟจะแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

จากกราฟการจำลองสถานการณ์ยังพบสิ่งที่น่าสนใจอีกคือ

หากพิจารณาในแต่ละค่า k_c ของยางหรือเส้นโค้งอื่น ๆ ที่มีค่า k_c แตกต่างกันจะพบว่า ขณะที่ค่าการหน่วงของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเร่งของรถยนต์มีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างมากจนถึงจุด ๆ หนึ่งอันเป็นจุดที่แสดงถึงระดับต่ำสุดของความเร่งของรถยนต์ หากค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนยังเพิ่มขึ้นไปอีก จากภาพกราฟจะแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม คือ ทำให้ขนาดของความเร่งและระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีการเพิ่มขึ้นทีละน้อย

สรุป

สรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองของระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ พบข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

1. เมื่อพิจารณาถึงการสั่นสะเทือน เพื่อให้ความเร่งของรถยนต์มีค่าน้อยที่สุด จึงสรุปได้ว่า

1.1 M ของรถยนต์มีค่ามาก

1.2 k_s ของยางมีค่าในช่วงต่ำ

1.3 B_d ของระบบมีค่าอยู่ในช่วงสูง

2. เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการควบคุมการจับชี้เพื่อให้ความปลอดภัยในการขับขี่ ต้องให้ค่าระยะการสปริงตัวของยางมีค่าน้อยที่สุด จึงสรุปได้ว่า

2.1 M ของรถยนต์มีค่าต่ำ

2.2 k_s ของยางมีค่าในช่วงสูง

2.3 B_d ของระบบมีค่าในช่วงสูง

3. เมื่อพิจารณาขีดจำกัดในการออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือน ถึงต้องให้ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน มีค่าน้อยที่สุด จะพบว่า

3.1 M ของรถยนต์ควรเลือกที่น้ำหนักต่ำๆ

3.2 k_s ของยางมีค่าในช่วงต่ำ

3.3 B_d ของระบบมีค่าในช่วงสูง

จุดออกแบบที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาถึงสภาพการใช้งานจริงการควบคุมทั้งสามปัจจัยพร้อมกัน อาจจะเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงข้อดีของทั้งสามปัจจัยอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะ สำหรับในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นด้านความปลอดภัยในการขับขี่เป็นประการสำคัญดังนี้ หากต้องการให้เกิดความปลอดภัยในการขับขี่

1. ค่าน้ำหนักของรถยนต์ต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสม โดยอยู่ในช่วงกึ่งกลาง
2. ค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน ควรเลือกให้อยู่ในช่วงที่มีค่าสูง
3. ค่าการสปริงตัวของยางควรเลือกในช่วงค่าสูง

จากกราฟแบบพรมจะพบว่า ณ แต่ละค่าของน้ำหนักของรถยนต์, ค่าการสปริงตัวของยาง และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนจะมีค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบเพื่อให้ขนาด ความเร่งของรถยนต์, ระยะการสปริงตัวของยาง และ ระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือนได้ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กัน

ข้อเสนอแนะ

การหาดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์นั้นนับว่ามี ความสำคัญอย่างยิ่ง ในกระบวนการออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและเพื่อความสะดวกสบาย ในการขับขี่ การคำนึงถึงน้ำหนักที่รถต้องรับภาระ การตรวจสอบระบบรองรับการสั่นสะเทือนหรือ โชคอัพและการตรวจสอบลมยางอยู่เป็นประจำและสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ใช้รถยนต์ควร พิจารณา จากงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยและความ สะดวกสบายในการขับขี่ของรถยนต์นั่ง 4 ล้อ ในรูปแบบการเคลื่อนที่ vertical and pitch motion ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรที่จะพิจารณาแบบจำลองชนิดเต็มรูปแบบและมีการเคลื่อนที่ในทุก ระนาบ เพื่อให้มีความใกล้เคียงสภาพจริงมากขึ้นและจะเป็นการดีที่จะมีผู้ทำการวิจัยเพื่อหาค่า K_r

ของถนนในพื้นที่ประเทศไทยเพราะหากในอนาคตประเทศไทยเป็นฐานการผลิตรถยนต์ที่ใหญ่ที่สุดในภูมิภาคเอเชีย งานด้านวิจัยและพัฒนาจะมีบทบาทมากขึ้นและถือเป็นโอกาสอันดีที่นักวิจัยชาวไทยจะได้ใช้ข้อมูลในการออกแบบและพัฒนารถยนต์ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัยวัฒน์ เทียนวิบูลย์.2528. กลศาสตร์ยานยนต์.พิมพ์ครั้งที่ 1.ม.ป.ท.

ธีระยุทธ สุวรรณประทีป.2542. วิศวกรรมยานยนต์.พิมพ์ครั้งที่1.วิथाพัฒน์,กรุงเทพฯ.

เชิรชัย บุญยะกุลและสมศักดิ์ นรสิงห์.2533. เทคนิคยานยนต์ เล่ม1 โครงสร้าง ล้อ ยางกันสะเทือน.ม.ป.ป. ซีเอ็ดยูเคชั่น,กรุงเทพฯ.

บัญชา คังตระกูล,ปานเพชร ชรินทร์และยงยศ จินารักษ์/2532. วิศวกรรมยานยนต์.พิมพ์ครั้งที่1 ซีเอ็ดยูเคชั่นมกรุงเทพฯ.

ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ. 2545. การสร้างและการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ **Passive Suspension** ของรถยนต์. ปีที่ 16 (47) : 134-149.

เผด็จ แสนเกษม2541. กลศาสตร์ยานยนต์.พิมพ์ครั้งที่ 1.ซีเอ็ดยูเคชั่น.กรุงเทพฯ.

มนัส สัตว์ศิลป์และวรรรัตน์ ภัทรอมรกุล.2543. คู่มือการใช้งาน **MATLAB ฉบับสมบูรณ์** .พิมพ์ครั้งที่ 1,อินโฟเพรส,กรุงเทพฯ.

มนตรี พิรุณเกษตร. วิศวกรรมการันสะเทือน. ม.ป.ปท.ซีเอ็ดยูเคชั่น,กรุงเทพฯ.

สิริศักดิ์ ปโยธรสิริ.2543. กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตศาสตร์.พิมพ์ครั้งที่ 1.น.ว.เพชรสกุล, กรุงเทพฯ.

สุวัฒน์ รอดผล. สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับวิศวกร.พิมพ์ครั้งที่1.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น),กรุงเทพฯ.

Campbell Campbell.1981. **Automotive Suspensions**,1st ed.Chaman and Hall,USA.

Crouse,H.William.1971. **Automotive Chasis and Body**,4th ed.McGraw-Hill,USA.

Gillespie,D.Thomas.1994. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**,3rd ed.Soceity of Automotive Engineerings.Inc, USA.

Hall,Brain.2002. **An introduction to Modern Vehicle Design**,1st ed.Butterworth-Heinemann, USA.

Heisler Heinz.1993. **Advanced Vehicle Technology**,3rd ed. Edward & Arnold, USA.

Katsuhiko Ogata.1994. **Solving Control Engineering Problems with MATLAB**, 1st ed. Prentice-Hall,Inc. USA

Walter,E.Brilliet and Walter Alley.1992. **Automotive Suspension,Steering,Alignment and Breakes**. 4th ed.American Technical Society,USA.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 แสดงค่าขนาดของความเร่งของตัวรถยนต์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของมวล(M) และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดให้ค่าคงที่การสปริงตัวของยาง kt คงที่เท่ากับ 140,000 N/m

Parameter	Car body acceleration(m/s ²)														
	M 1000kg	M 1050 kg	M 1100 kg	M 1150 kg	M 1200 kg	M 1250 kg	M 1300 kg	M 1350 kg	M 1400 kg	M 1450 kg	M 1500 kg	M 1550 kg	M 1600 kg	M 1650 kg	M 1700 kg
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	1.4588	1.4146	1.3815	1.3639	1.3663	1.3629	1.3328	1.2987	1.2833	1.2822	1.2741	1.2762	1.2978	1.3072	1.2773
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	1.2223	1.1815	1.1466	1.1185	1.0965	1.0773	1.0584	1.0405	1.0258	1.0149	1.0066	1.0006	0.9958	0.9893	0.9789
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	1.0947	1.0595	1.0273	0.9989	0.9743	0.9529	0.9340	0.9171	0.9023	0.8894	0.8783	0.8685	0.8593	0.8501	0.8404
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	1.0178	0.9863	0.9568	0.9298	0.9056	0.8840	0.8647	0.8475	0.8321	0.8182	0.8057	0.7942	0.7836	0.7734	0.7634
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	0.9717	0.9423	0.9145	0.8887	0.8650	0.8434	0.8238	0.8061	0.7901	0.7754	0.7620	0.7497	0.7382	0.7274	0.7171
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	0.9457	0.9173	0.8903	0.8651	0.8416	0.8199	0.8000	0.7818	0.7651	0.7498	0.7357	0.7227	0.7105	0.6991	0.6884
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	0.9331	0.9049	0.8782	0.8531	0.8296	0.8077	0.7875	0.7687	0.7515	0.7355	0.7207	0.7070	0.6942	0.6823	0.6710
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	0.9296	0.9012	0.8744	0.8492	0.8254	0.8033	0.7826	0.7633	0.7455	0.7289	0.7135	0.6991	0.6857	0.6732	0.6614
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	0.9323	0.9036	0.8765	0.8509	0.8269	0.8043	0.7832	0.7634	0.7450	0.7278	0.7117	0.6968	0.6828	0.6696	0.6573
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	0.9395	0.9103	0.8828	0.8568	0.8323	0.8093	0.7877	0.7674	0.7484	0.7307	0.7140	0.6985	0.6839	0.6702	0.6573
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	0.9499	0.9201	0.8921	0.8657	0.8407	0.8173	0.7951	0.7744	0.7548	0.7365	0.7193	0.7031	0.6880	0.6737	0.6603
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	0.9625	0.9322	0.9037	0.8767	0.8513	0.8274	0.8048	0.7835	0.7634	0.7445	0.7268	0.7101	0.6944	0.6796	0.6656
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	0.9769	0.9460	0.9169	0.8895	0.8636	0.8391	0.8160	0.7942	0.7737	0.7543	0.7360	0.7187	0.7025	0.6871	0.6727
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	0.9925	0.9611	0.9314	0.9035	0.8771	0.8521	0.8285	0.8062	0.7851	0.7652	0.7464	0.7287	0.7119	0.6961	0.6811
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	1.0090	0.9771	0.9469	0.9184	0.8915	0.8661	0.8420	0.8192	0.7976	0.7772	0.7579	0.7396	0.7224	0.7060	0.6906

ตารางผนวกที่ 2 แสดงค่าขนาดของระยะการสปริงตัวของยางเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของมวล(M) และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดให้ค่าคงที่การสปริงตัวของยาง k_t คงที่เท่ากับ 140,000 N/m

Parameter	Tyre Deflection (mm)														
	M 1000 kg	M 1050 kg	M 1100 kg	M 1150 kg	M 1200 kg	M 1250 kg	M 1300 kg	M 1350 kg	M 1400 kg	M 1450 kg	M 1500 kg	M 1550 kg	M 1600 kg	M 1650 kg	M 1700 kg
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	3.4424	3.4872	3.5770	3.7239	3.9411	4.1295	4.2053	4.2516	4.3599	4.5196	4.6490	4.8165	5.0641	5.2630	5.2919
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	2.8501	2.8495	2.8761	2.9297	3.0038	3.0848	3.1620	3.2378	3.3205	3.4124	3.5109	3.6156	3.7234	3.8216	3.9008
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	2.5805	2.5705	2.5754	2.5959	2.6301	2.6746	2.7259	2.7821	2.8429	2.9082	2.9773	3.0488	3.1206	3.1900	3.2548
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	2.4453	2.4336	2.4309	2.4382	2.4552	2.4809	2.5138	2.5525	2.5958	2.6430	2.6933	2.7457	2.7992	2.8526	2.9050
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	2.3821	2.3705	2.3647	2.3657	2.3738	2.3886	2.4095	2.4358	2.4665	2.5010	2.5384	2.5781	2.6195	2.6618	2.7045
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	2.3620	2.3505	2.3431	2.3405	2.3433	2.3513	2.3644	2.3821	2.4039	2.4291	2.4573	2.4879	2.5205	2.5544	2.5894
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	2.3692	2.3574	2.3488	2.3439	2.3431	2.3465	2.3542	2.3658	2.3811	2.3996	2.4209	2.4447	2.4705	2.4979	2.5267
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	2.3942	2.3818	2.3719	2.3651	2.3617	2.3618	2.3655	2.3727	2.3831	2.3965	2.4126	2.4311	2.4516	2.4739	2.4977
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	2.4309	2.4176	2.4065	2.3980	2.3925	2.3900	2.3906	2.3943	2.4009	2.4104	2.4223	2.4366	2.4529	2.4711	2.4908
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	2.4754	2.4609	2.4485	2.4384	2.4310	2.4263	2.4244	2.4254	2.4290	2.4352	2.4439	2.4548	2.4677	2.4824	2.4988
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	2.5251	2.5092	2.4953	2.4837	2.4746	2.4679	2.4640	2.4626	2.4637	2.4673	2.4733	2.4814	2.4915	2.5034	2.5169
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	2.5780	2.5607	2.5453	2.5321	2.5213	2.5129	2.5070	2.5036	2.5027	2.5041	2.5078	2.5135	2.5212	2.5307	2.5419
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	2.6330	2.6141	2.5971	2.5823	2.5699	2.5598	2.5523	2.5471	2.5443	2.5438	2.5456	2.5493	2.5550	2.5625	2.5717
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	2.6892	2.6686	2.6499	2.6335	2.6195	2.6078	2.5987	2.5919	2.5875	2.5854	2.5854	2.5875	2.5914	2.5972	2.6046
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	2.7459	2.7235	2.7031	2.6850	2.6694	2.6563	2.6456	2.6374	2.6315	2.6279	2.6264	2.6270	2.6295	2.6338	2.6398

ตารางผนวกที่ 3 แสดงค่าขนาดของความเร่งของรถยนต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าคงที่การสปริงตัวของยาง(kt) และค่าการหน่วงของระบบรองรับการ
 สั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดให้มวลของรถยนต์(M) คงที่ เท่ากับ 1,250 kg

Car body acceleration m/s ²)															
Parameter	kt 50,000 N/m	kt 65,000 N/m	kt 80,000 N/m	kt 95,000 N/m	kt 110,000 N/m	kt 125,000 N/m	kt 140,000 N/m	kt 155,000 N/m	kt 170,000 N/m	kt 185,000 N/m	kt 200,000 N/m	kt 215,000 N/m	kt 230,000 N/m	kt 245,000 N/m	kt 260,000 N/m
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	0.9230	1.0355	1.0663	1.1079	1.2055	1.2476	1.2773	1.3099	1.2908	1.2696	1.2632	1.2648	1.2643	1.2605	1.2567
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	0.8115	0.8688	0.8827	0.9073	0.9444	0.9664	0.9789	0.9834	0.9818	0.9789	0.9767	0.9753	0.9746	0.9743	0.9744
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	0.7357	0.7712	0.7822	0.8003	0.8204	0.8333	0.8404	0.8436	0.8451	0.8461	0.8472	0.8485	0.8501	0.8519	0.8539
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	0.6819	0.7079	0.7190	0.7342	0.7481	0.7575	0.7634	0.7676	0.7711	0.7744	0.7778	0.7813	0.7850	0.7888	0.7927
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	0.6426	0.6644	0.6767	0.6906	0.7022	0.7106	0.7171	0.7227	0.7280	0.7333	0.7386	0.7441	0.7497	0.7554	0.7612
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	0.6135	0.6339	0.6476	0.6611	0.6720	0.6808	0.6884	0.6955	0.7026	0.7097	0.7169	0.7242	0.7315	0.7389	0.7464
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	0.5919	0.6123	0.6274	0.6412	0.6525	0.6621	0.6710	0.6797	0.6884	0.6972	0.7060	0.7149	0.7238	0.7328	0.7418
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	0.5759	0.5971	0.6138	0.6282	0.6403	0.6511	0.6614	0.6716	0.6817	0.6920	0.7022	0.7125	0.7229	0.7333	0.7436
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	0.5643	0.5868	0.6051	0.6205	0.6336	0.6457	0.6573	0.6688	0.6803	0.6918	0.7033	0.7148	0.7264	0.7380	0.7496
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	0.5560	0.5802	0.6001	0.6166	0.6310	0.6444	0.6573	0.6700	0.6826	0.6951	0.7077	0.7203	0.7329	0.7455	0.7581
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	0.5505	0.5765	0.5980	0.6158	0.6315	0.6462	0.6603	0.6741	0.6876	0.7011	0.7145	0.7279	0.7414	0.7549	0.7684
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	0.5471	0.5751	0.5981	0.6174	0.6345	0.6504	0.6656	0.6803	0.6947	0.7089	0.7230	0.7371	0.7513	0.7656	0.7799
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	0.5454	0.5754	0.6001	0.6208	0.6393	0.6565	0.6727	0.6882	0.7033	0.7181	0.7328	0.7475	0.7623	0.7771	0.7920
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	0.5450	0.5771	0.6034	0.6256	0.6456	0.6640	0.6811	0.6974	0.7131	0.7284	0.7436	0.7587	0.7739	0.7892	0.8046
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	0.5458	0.5799	0.6078	0.6316	0.6530	0.6725	0.6906	0.7075	0.7237	0.7395	0.7550	0.7705	0.7861	0.8017	0.8176

ตารางผนวกที่ 4 แสดงค่าขนาดของระยะการสปริงตัวของยางเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าคงที่การสปริงตัวของยาง(kt)และค่าการหน่วงของระบบรองรับ
การสั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดให้มวลของรถยนต์ (M) คงที่เท่ากับ 1,250 kg

Parameter	Tyre Deflection (mm)														
	50,000 N/m	65,000 N/m	80,000 N/m	95,000 N/m	110,000 N/m	125,000 N/m	140,000 N/m	155,000 N/m	170,000 N/m	185,000 N/m	200,000 N/m	215,000 N/m	230,000 N/m	245,000 N/m	260,000 N/m
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	10.7510	9.2914	7.7658	6.7668	6.3450	5.7776	5.2919	4.9159	4.4318	4.0258	3.7293	3.4992	3.2969	3.1148	2.9570
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	9.2909	7.6187	6.2449	5.3608	4.7961	4.3105	3.9008	3.5485	3.2435	2.9891	2.7794	2.6047	2.4575	2.3323	2.2249
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	8.2758	6.6145	5.3906	4.5984	4.0484	3.6115	3.2548	2.9610	2.7190	2.5197	2.3544	2.2161	2.0993	1.9997	1.9142
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	7.5392	5.9493	4.8472	4.1276	3.6157	3.2197	2.9050	2.6519	2.4466	2.2784	2.1391	2.0224	1.9235	1.8391	1.7662
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	6.9902	5.4852	4.4809	3.8205	3.3471	2.9864	2.7045	2.4804	2.2998	2.1520	2.0294	1.9264	1.8389	1.7637	1.6986
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	6.5743	5.1521	4.2273	3.6156	3.1767	2.8457	2.5894	2.3868	2.2237	2.0900	1.9787	1.8848	1.8046	1.7353	1.6749
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	6.2561	4.9098	4.0498	3.4786	3.0694	2.7629	2.5267	2.3403	2.1899	2.0663	1.9629	1.8751	1.7997	1.7342	1.6767
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	6.0116	4.7328	3.9260	3.3885	3.0044	2.7180	2.4977	2.3236	2.1827	2.0663	1.9684	1.8849	1.8126	1.7495	1.6938
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	5.8236	4.6038	3.8408	3.3315	2.9684	2.6984	2.4908	2.3263	2.1925	2.0814	1.9874	1.9068	1.8367	1.7751	1.7204
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	5.6798	4.5110	3.7841	3.2983	2.9528	2.6963	2.4988	2.3416	2.2133	2.1061	2.0150	1.9363	1.8676	1.8069	1.7529
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	5.5706	4.4457	3.7485	3.2825	2.9518	2.7063	2.5169	2.3655	2.2413	2.1370	2.0479	1.9706	1.9028	1.8427	1.7890
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	5.4890	4.4016	3.7290	3.2795	2.9612	2.7249	2.5419	2.3951	2.2740	2.1719	2.0842	2.0079	1.9406	1.8808	1.8271
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	5.4294	4.3739	3.7216	3.2860	2.9782	2.7494	2.5717	2.4284	2.3097	2.2091	2.1224	2.0467	1.9798	1.9201	1.8664
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	5.3876	4.3592	3.7236	3.2998	3.0007	2.7782	2.6046	2.4642	2.3472	2.2477	2.1618	2.0864	2.0197	1.9600	1.9062
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	5.3603	4.3547	3.7329	3.3190	3.0274	2.8100	2.6398	2.5014	2.3857	2.2870	2.2015	2.1263	2.0596	1.9999	1.9459

ตารางผนวกที่ 5 แสดงค่าขนาดของระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของมวล(M) และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดให้ค่าคงที่การสปริงตัวของยาง kt คงที่ เท่ากับ 140,000 N/m

Parameter	Suspension stroke displacement (mm)														
	M 1000kg	M 1050 kg	M 1100 kg	M 1150 kg	M 1200 kg	M 1250 kg	M 1300 kg	M 1350 kg	M 1400 kg	M 1450 kg	M 1500 kg	M 1550 kg	M 1600 kg	M 1650 kg	M 1700 kg
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	5.8978	5.9947	6.1060	6.2540	6.4649	6.6575	6.7479	6.8135	6.9489	7.1431	7.3028	7.5071	7.8102	8.0602	8.0991
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	5.0265	5.1002	5.1747	5.2581	5.3522	5.4489	5.5397	5.6284	5.7259	5.8356	5.9537	6.0797	6.2100	6.3288	6.4238
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	4.5433	4.6131	4.6782	4.7437	4.8121	4.8837	4.9573	5.0328	5.1113	5.1938	5.2800	5.3685	5.4568	5.5415	5.6198
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	4.2270	4.2945	4.3562	4.4154	4.4747	4.5353	4.5975	4.6616	4.7274	4.7950	4.8642	4.9343	5.0042	5.0727	5.1389
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	4.0071	4.0717	4.1308	4.1864	4.2406	4.2947	4.3495	4.4052	4.4621	4.5200	4.5787	4.6379	4.6972	4.7559	4.8136
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	3.8484	3.9098	3.9661	4.0187	4.0692	4.1187	4.1681	4.2177	4.2680	4.3188	4.3702	4.4219	4.4738	4.5255	4.5769
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	3.7307	3.7888	3.8422	3.8920	3.9394	3.9853	4.0304	4.0754	4.1205	4.1660	4.2117	4.2577	4.3040	4.3502	4.3964
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	3.6414	3.6963	3.7469	3.7941	3.8387	3.8816	3.9233	3.9645	4.0055	4.0466	4.0878	4.1292	4.1708	4.2125	4.2543
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	3.5726	3.6244	3.6724	3.7171	3.7592	3.7993	3.8382	3.8762	3.9138	3.9513	3.9888	4.0263	4.0640	4.1019	4.1399
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	3.5187	3.5678	3.6132	3.6556	3.6953	3.7332	3.7695	3.8048	3.8396	3.8740	3.9082	3.9425	3.9769	4.0114	4.0461
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	3.4762	3.5227	3.5658	3.6059	3.6435	3.6792	3.7133	3.7463	3.7785	3.8103	3.8418	3.8733	3.9048	3.9363	3.9680
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	3.4422	3.4864	3.5273	3.5654	3.6010	3.6347	3.6668	3.6977	3.7277	3.7572	3.7863	3.8153	3.8442	3.8732	3.9023
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	3.4150	3.4570	3.4959	3.5320	3.5658	3.5977	3.6279	3.6570	3.6850	3.7125	3.7395	3.7662	3.7929	3.8196	3.8464
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	3.3930	3.4330	3.4700	3.5044	3.5365	3.5666	3.5952	3.6225	3.6488	3.6744	3.6995	3.7243	3.7490	3.7737	3.7984
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	3.3752	3.4134	3.4487	3.4814	3.5118	3.5404	3.5674	3.5931	3.6178	3.6417	3.6651	3.6882	3.7111	3.7339	3.7568

ตารางผนวกที่ 6 แสดงค่าขนาดของระยะชักของระบบรองรับการสั่นสะเทือน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าค่าคงที่การสปริงตัวของยาง (kt) และค่าการหน่วงของระบบรองรับการสั่นสะเทือน(Bd) โดยกำหนดค้ำให้ ของมวล(M)เท่ากับ 1,250 kg

Parameter	Suspension stoke displacement (mm)														
	50,000 N/m	65,000 N/m	80,000 N/m	95,000 N/m	110,000 N/m	125,000 N/m	140,000 N/m	155,000 N/m	170,000 N/m	185,000 N/m	200,000 N/m	215,000 N/m	230,000 N/m	245,000 N/m	260,000 N/m
Bd = 1,000 N/ms ⁻¹	5.3423	5.9848	6.3813	6.8291	7.5260	7.8669	8.0991	8.3304	8.2615	8.1707	8.1578	8.1867	8.1994	8.1891	8.1773
Bd = 1,050 N/ms ⁻¹	4.8360	5.2533	5.5196	5.8105	6.1179	6.3075	6.4238	6.4825	6.4964	6.4956	6.4937	6.4925	6.4918	6.4917	6.4922
Bd = 1,100 N/ms ⁻¹	4.4929	4.8194	5.0408	5.2546	5.4364	5.5524	5.6198	5.6551	5.6722	5.6807	5.6853	5.6882	5.6901	5.6916	5.6927
Bd = 1,150 N/ms ⁻¹	4.2436	4.5277	4.7253	4.8929	5.0169	5.0942	5.1389	5.1642	5.1787	5.1876	5.1933	5.1973	5.2003	5.2026	5.2044
Bd = 1,200 N/ms ⁻¹	4.0536	4.3155	4.4965	4.6337	4.7257	4.7812	4.8136	4.8329	4.8447	4.8525	4.8579	4.8618	4.8648	4.8672	4.8692
Bd = 1,250 N/ms ⁻¹	3.9035	4.1526	4.3207	4.4365	4.5090	4.5517	4.5769	4.5922	4.6020	4.6086	4.6133	4.6167	4.6193	4.6213	4.6229
Bd = 1,300 N/ms ⁻¹	3.7816	4.0227	4.1801	4.2808	4.3407	4.3756	4.3964	4.4092	4.4175	4.4231	4.4269	4.4296	4.4315	4.4329	4.4338
Bd = 1,350 N/ms ⁻¹	3.6804	3.9162	4.0647	4.1543	4.2061	4.2362	4.2543	4.2656	4.2728	4.2775	4.2805	4.2824	4.2834	4.2838	4.2838
Bd = 1,400 N/ms ⁻¹	3.5949	3.8269	3.9679	4.0496	4.0961	4.1233	4.1399	4.1502	4.1567	4.1607	4.1628	4.1638	4.1638	4.1632	4.1622
Bd = 1,450 N/ms ⁻¹	3.5216	3.7506	3.8855	3.9615	4.0046	4.0303	4.0461	4.0559	4.0619	4.0652	4.0665	4.0665	4.0655	4.0639	4.0618
Bd = 1,500 N/ms ⁻¹	3.4579	3.6846	3.8143	3.8862	3.9275	3.9524	3.9680	3.9777	3.9833	3.9860	3.9865	3.9856	3.9836	3.9810	3.9778
Bd = 1,550 N/ms ⁻¹	3.4020	3.6267	3.7522	3.8213	3.8616	3.8865	3.9023	3.9121	3.9174	3.9195	3.9194	3.9175	3.9146	3.9109	3.9067
Bd = 1,600 N/ms ⁻¹	3.3525	3.5755	3.6974	3.7647	3.8047	3.8301	3.8464	3.8563	3.8615	3.8632	3.8624	3.8597	3.8559	3.8512	3.8460
Bd = 1,650 N/ms ⁻¹	3.3084	3.5298	3.6488	3.7149	3.7551	3.7814	3.7984	3.8086	3.8138	3.8151	3.8137	3.8103	3.8055	3.7999	3.7938
Bd = 1,700 N/ms ⁻¹	3.2689	3.4888	3.6054	3.6707	3.7116	3.7389	3.7568	3.7675	3.7726	3.7737	3.7717	3.7677	3.7621	3.7556	3.7486