



บทที่ 5

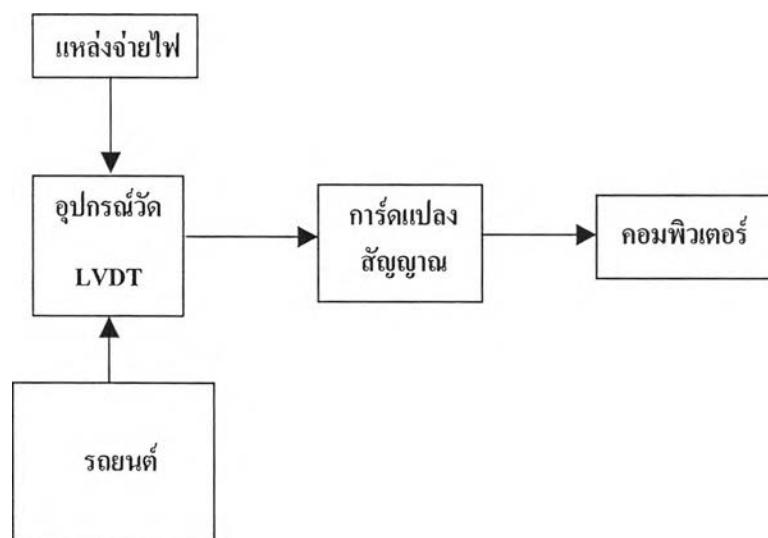
การทดลองและการวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์

บทนี้เป็นการทดลองให้การเคลื่อนที่เริ่มต้นกับรถยนต์ แล้วปล่อยให้รถยนต์เคลื่อนที่อย่างอิสระ และทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งต่างๆของรถยนต์ ให้เพียงพอต่อการกำหนดการเคลื่อนที่ 7 ระดับขั้นเสรี จากนั้นจึงนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) อุปกรณ์วัดระยะทาง LVDT พร้อมโครงจับยึด จำนวน 8 ชุด
- 2) เกจบล็อกมาตรฐาน 1 มม. ถึง 5 มม.
- 3) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- 4) แหล่งจ่ายไฟ 10 โวลต์
- 5) การ์ดแปลงสัญญาณ (A/D card) พร้อมเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)
- 6) ก้อนอิฐและก้อนมวล แทนน้ำหนักบรรทุกทุก 180 kg

การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆเป็นดังรูป 5.1

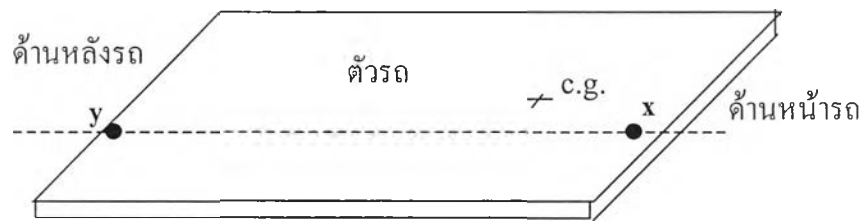


รูปที่ 5.1 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์การทดลอง

5.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ติดแผ่นเหล็กขนาดเล็กขึ้นจากตัวรถและล้อเพื่อเป็นฐานรองเข็มของ อุปกรณ์วัดLVDT รวมทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง (เช่นเดียวกับการทดลองหัวข้อ 4.1)

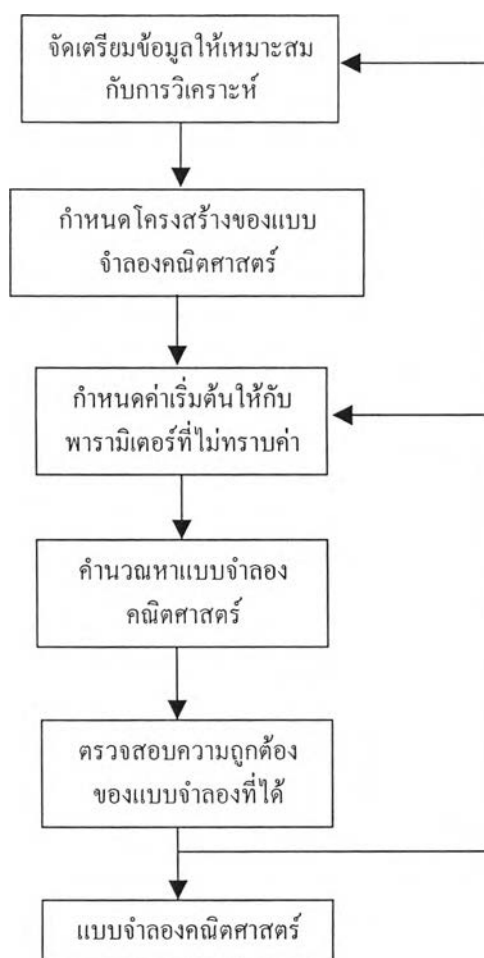
- 2) ติดตั้ง LVDT จำนวน 8 ตัว (จ่ายไฟเลี้ยงประมาณ 10 โวลต์) โดยปรับเลื่อนความสูงของตัว LVDT ให้อ่านค่าสัญญาณออกได้ประมาณ 0 โวลต์ จากนั้นปรับเทียบอุปกรณ์วัด (calibrate) ด้วยเกจบล็อกมาตรฐาน เพื่อหาค่าความไว (sensitivity) ของอุปกรณ์วัดแต่ละตัว
- 3) เชื่อมต่อสายสัญญาณจาก LVDT เข้ากับการ์ดแปลงสัญญาณซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์
- 4) เก็บข้อมูลผลตอบสนอง โดยให้การเคลื่อนที่เริ่มต้นกับรถยนต์ ด้วยการให้ผู้ทดลอง 2 คน กดตัวรถ ณ ตำแหน่ง x และ y ดังรูปที่ 5.2 จากนั้นปล่อยมือพร้อมกัน และปล่อยให้รถยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ข้อมูลผลตอบสนองตามตำแหน่งต่างๆ ของตัวรถและล้อรถ ถูกเก็บเข้าคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D



รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งที่ทดลองกด โดยมีผู้ทดลอง 2 คน กดพร้อมกัน

5.3 การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพรวมการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.3 แผนภาพการวิเคราะห์หาแบบจำลองคณิตศาสตร์จากข้อมูลการสังเกตจากการทดลอง

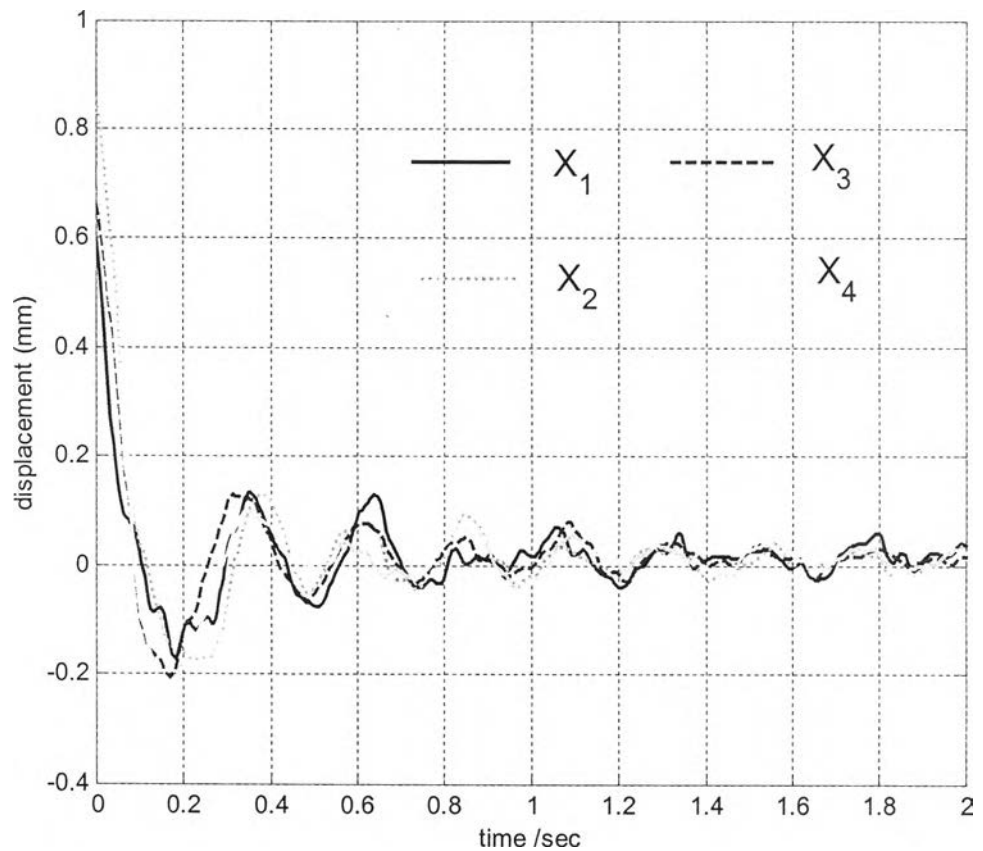
การวิเคราะห์เริ่มต้นที่จัดเตรียมข้อมูล ได้แก่การกรองความถี่ (filter) , การปรับศูนย์กลาง (remove mean), การเปลี่ยนโคออร์ดิเนต และการเลือกช่วงของข้อมูลที่เหมาะสม จากนั้นจึงกำหนดโครงสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างแบบจำลอง จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำเพื่อคำนวณหาแบบจำลอง

ขั้นตอนสุดท้ายของการวิเคราะห์ คือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ ซึ่งทำได้โดยตรวจสอบความเหมาะสมของพารามิเตอร์กายภาพและพารามิเตอร์โมดัลที่ได้รับจากแบบจำลอง รวมถึงนำแบบจำลองที่ได้ไปทำนายผลตอบสนองการสั่นจากข้อมูลการทดลองชุดอื่นที่ไม่ได้ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองว่าสามารถทำนายผลได้ดีหรือไม่ หากแบบจำลองที่ได้ไม่เหมาะสมอาจย้อนกลับไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่แล้วมาได้ เช่น เลือกช่วงของข้อมูลใหม่, กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นใหม่ ทั้งนี้เพื่อให้ได้รับแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

5.3.1 จัดเตรียมข้อมูลให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์

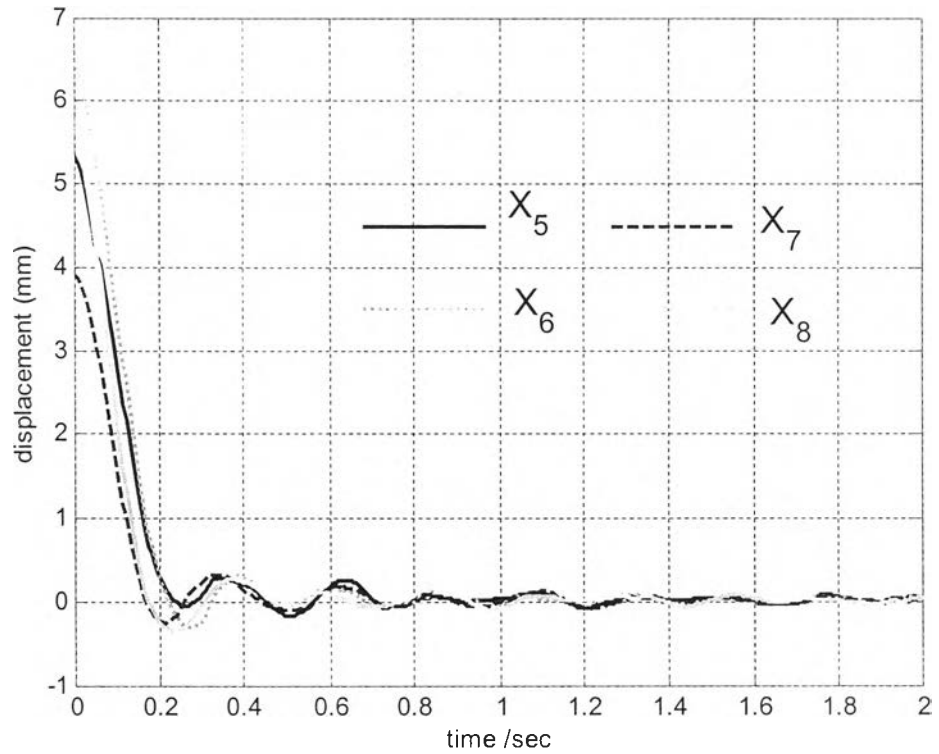
ข้อมูลการเคลื่อนที่ในแต่ละตำแหน่งที่วัดได้ จะถูกนำเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านทางการ์ดแปลงสัญญาณด้วยเวลาการสุ่มตัวอย่าง (sampling time) 5 msec (sampling frequency 200 Hz) โดยคัดเลือกช่วงของข้อมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์ 2 sec (จำนวนข้อมูล 400 ข้อมูล)

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาตามตารางที่ 1.1 ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 13 Hz ดังนั้นจึงเลือกกรองความถี่สูงที่ค่าความถี่คัตออฟ (cut-off frequency) 20 Hz จากนั้นทำการปรับศูนย์, แปลงหน่วยจากข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นข้อมูลการเคลื่อนที่ได้ผลดังรูปที่ 5.4 และ 5.5



รูป 5.4 ผลตอบสนองของล้อหน้าขวา, ล้อหน้าซ้าย, ล้อหลังขวา และล้อหลังซ้าย

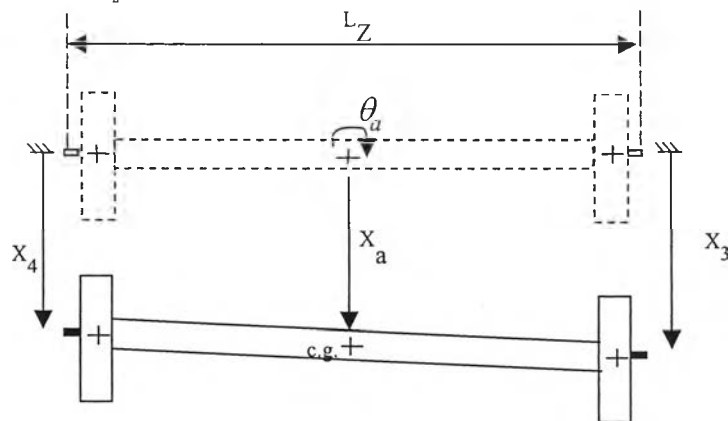
(X_1 , X_2 , X_3 , X_4 ตามลำดับ)



รูป 5.5 ผลตอบสนองของตัวรอดด้านหน้าขวา, หน้าซ้าย, หลังขวา และหลังซ้าย
(X_5, X_6, X_7, X_8 ตามลำดับ)

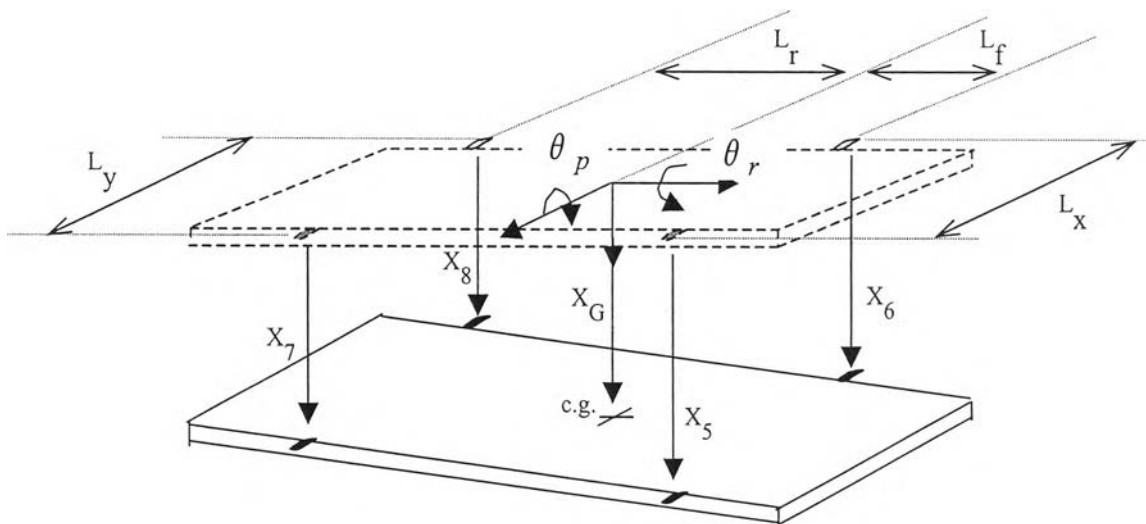
โคออร์ดิเนตที่วัดได้คือ $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ แต่โคออร์ดิเนตที่จะใช้ในการวิเคราะห์คือ $X_1, X_2, X_a, \theta_a, X_G, \theta_p, \theta_r$

โคออร์ดิเนต X_1, X_2 เป็นการเคลื่อนที่ของล้อหน้าด้านขวาและซ้าย ตามลำดับ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ได้ทันที แต่โคออร์ดิเนต X_3, X_4 เป็นการเคลื่อนที่ของล้อหลังที่ต้องแปลงโคออร์ดิเนตเป็น X_a, θ_a ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูป 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนตที่วัดได้ (X_3, X_4) กับโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์ (X_a, θ_a) ของชุดเพลาล้อหลัง

ส่วนโคออร์ดิเนต X_5, X_6, X_7, X_8 จะต้องแปลงเป็น X_G, θ_p, θ_r ดังรูป 5.7

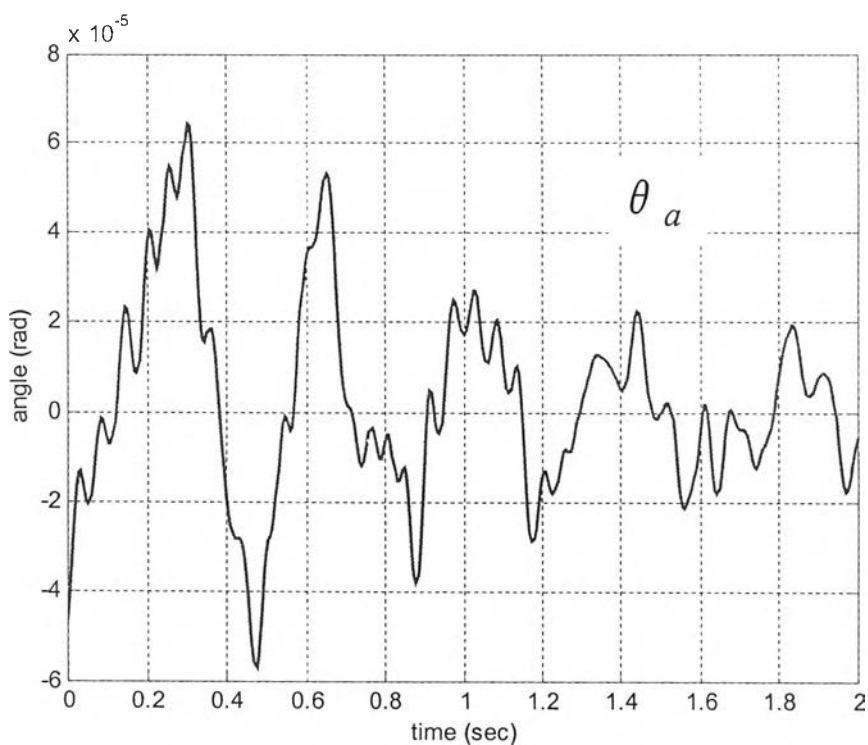
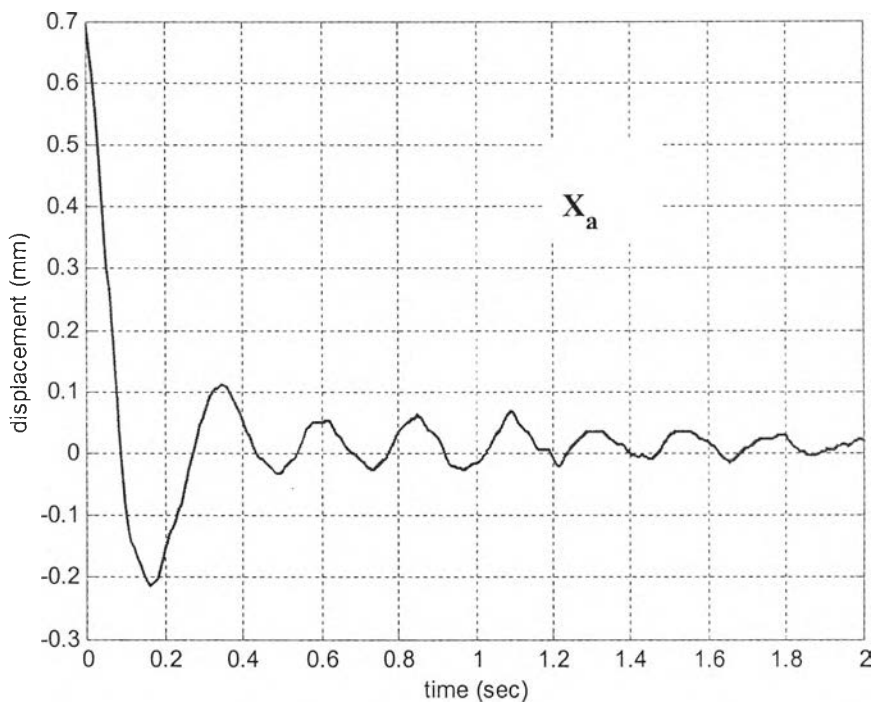


รูป 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนตที่วัดได้ (X_5, X_6, X_7, X_8) กับโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์ (X_G, θ_p, θ_r) ของมวลลูกแฉก

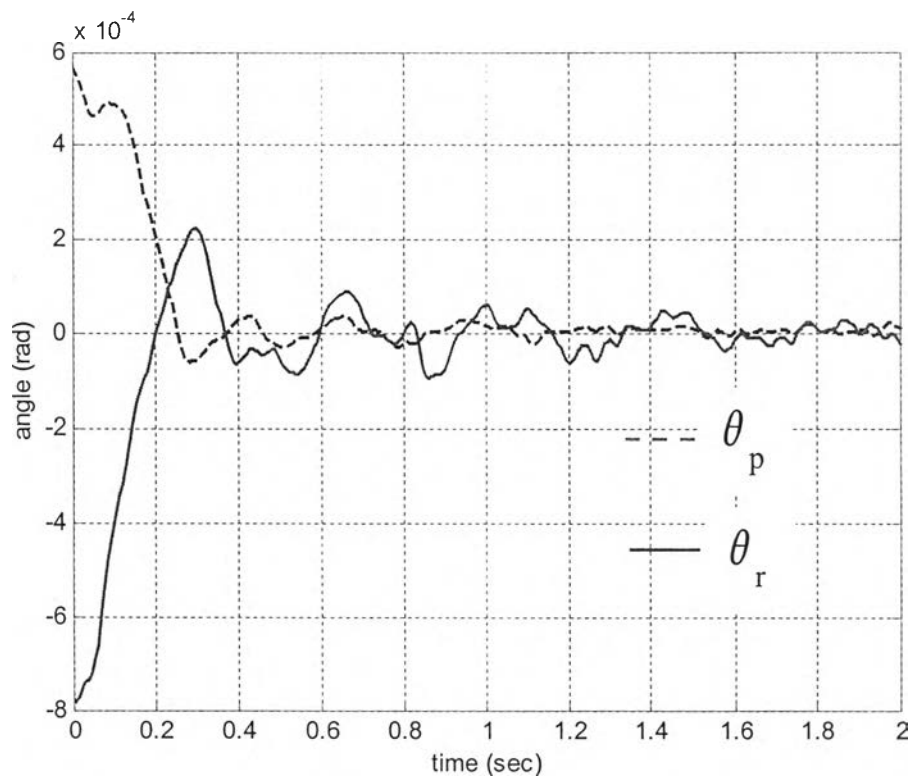
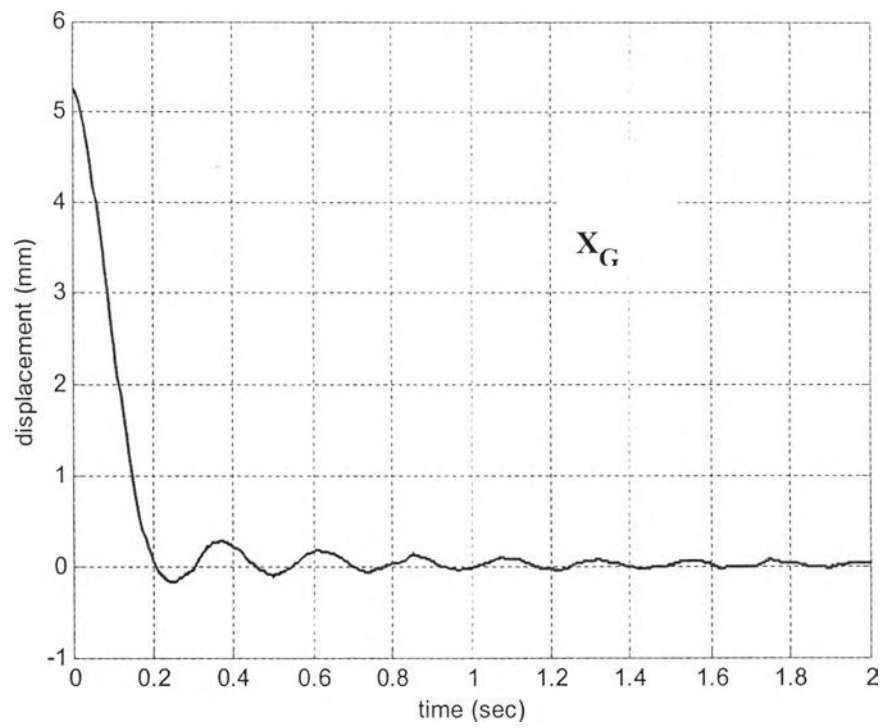
สำหรับการที่ใช้ในการแปลงโคออร์ดิเนตเป็นดังนี้

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{L_z}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{L_z}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L_f & \frac{L_{x_c}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L_f & -\frac{L_{x_c}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -L_r & \frac{L_{y_c}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{Bmatrix}$$

ผลการแปลงโคออร์ดิเนตเป็น $X_a, \theta_a, X_G, \theta_p, \theta_r$ แสดงดังรูป 5.8 และ 5.9



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของชุดเพลาล้อหลัง X_a, θ_a



รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของมวลลูกแขวน (ตัวรถ) X_G, θ_p, θ_r

5.3.2 กำหนดโครงสร้างของแบบจำลองคณิตศาสตร์

โครงสร้างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์คือแบบจำลองปริภูมิเสถตแบบต่อเนื่อง ดังสมการที่ (3.15) คือ

$$\dot{\{x\}} = A\{x\} + B\{u\}$$

$$\{y\} = C\{x\} + D\{u\}$$

โดย

$$A = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ I_7 & \underline{0}_{7 \times 7} \end{bmatrix}, \quad B = \underline{0}_{14 \times 1}$$

$$C = [\underline{0}_{7 \times 7} \quad I_7], \quad D = \underline{0}_{7 \times 1}$$

เนื่องจากอินพุทของแบบจำลองมีเฉพาะเงื่อนไขเริ่มต้น $\{x(0)\}$ ดังนั้นจึงกำหนดให้เมทริกซ์ B มีค่าเป็น $\underline{0}$ ส่วนเอาต์พุทของแบบจำลองมีทั้งสิ้น 7 ตัว คือ $X_1, X_2, X_3, \theta_a, X_G, \theta_p, \theta_r$ ซึ่งเป็นเอาต์พุทที่จะใช้ในการทำเคิร์ฟฟิตติ้ง โดยมีเป้าหมายคือปรับหาค่าพารามิเตอร์กายภาพภายในเมทริกซ์ A เพื่อให้ได้ผลการฟิตที่ดีที่สุด

5.3.3 กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

ค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่า (known parameters) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้หรือหามาได้โดยตรง ได้แก่คุณสมบัติเชิงมวล, คุณสมบัติเชิงมิติ และ คุณสมบัติความเฉื่อยเชิงมวลของชุดเพลาล้อหลัง ค่าต่างๆเหล่านี้จะไม่ถูกโปรแกรมปรับเปลี่ยนค่า (มีค่าคงที่ตลอดการทำซ้ำ) เนื่องจากเป็นค่าที่มีความถูกต้องพอสมควร ค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าได้แก่

- คุณสมบัติเชิงมวล

$$M_b = 911 \text{ kg}, \quad M_a = 95 \text{ kg}, \quad M_w = 32 \text{ kg}$$

เป็นค่าที่หาได้จากการชั่ง และการประมาณ

- คุณสมบัติเชิงมิติ

$$L_f = 1.14 \text{ m}, \quad L_r = 1.34 \text{ m}, \quad L_t = 1.205 \text{ m},$$

$$L_c = 0.805 \text{ m}, \quad L_s = 0.885 \text{ m}$$

เป็นค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณหาจุด c.g. (รายละเอียดอยู่ภาคผนวก ง)

- ค่าความเฉื่อยเชิงมวลรอบจุด c.g. ของชุดเพลาล้อหลัง

$$I_a = 26.03 \text{ kg-m}^2$$

เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรโมเมนต์ความเฉื่อย ($I = mr^2$)

(รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ง)

สำหรับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (unknown parameters) ได้แก่ ค่าความเฉื่อยเชิงมวลของตัวรถและค่าความแข็งสปริงกับค่าความหน่วง จากหลักการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำ โปรแกรมต้องการค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเหล่านี้ ก่อนที่จะทำการปรับค่าที่จะทำให้แบบจำลองพัฒนาการทดลองได้ดีที่สุด ค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมเป็นดังนี้

- ค่าความแข็งสปริงของยางล้อรถ

$$K_l = 180 \text{ kN/m}$$

เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.3 โดยเลือกค่าความแข็งสปริงเฉลี่ย ณ ตำแหน่งแรงกด 220 kg ที่ล้อมีการเคลื่อนที่น้อยสุด (2.18 mm) เนื่องจากหากพิจารณารูปที่ 5.4 ล้อทุกล้อมีการเคลื่อนที่น้อยมาก (ต่ำกว่า 1 mm)

- ค่าความเฉื่อยเชิงมวลของตัวรถ

$$I_p = 1319 \text{ kg-m}^2, \quad I_r = 282 \text{ kg-m}^2$$

- ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวน

$$K_{sf} = 76.903 \text{ kN/m}, \quad K_{sr} = 105.130 \text{ kN/m}$$

- ค่าความหน่วงของระบบแขวน

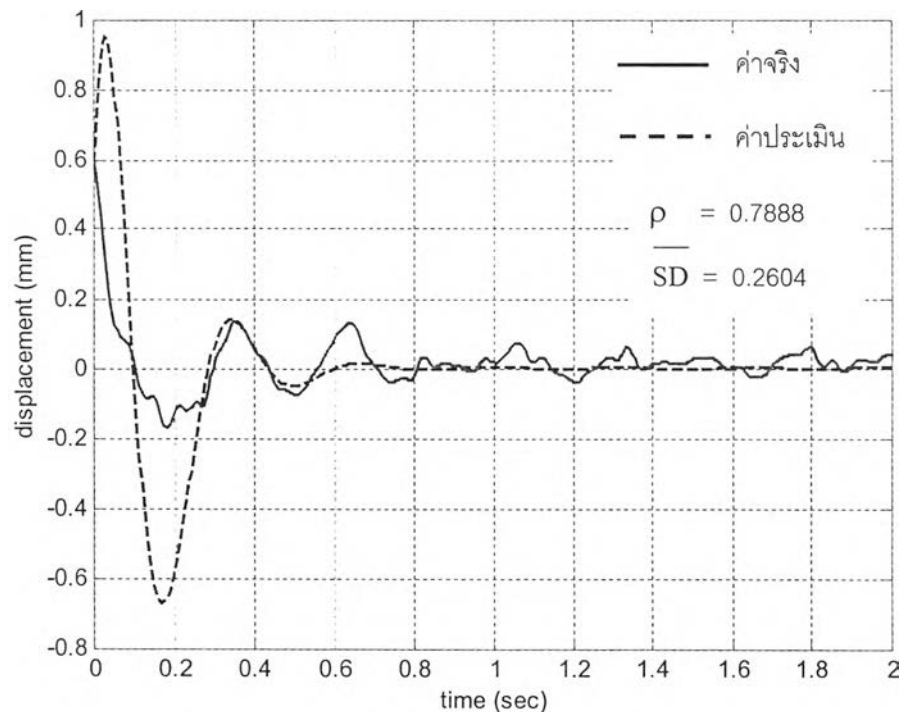
$$C_{sf} = 5.535 \text{ kN-s/m}, \quad C_{sr} = 5.388 \text{ kN-s/m}$$

ค่าเริ่มต้นของ I_p , I_r , K_{sf} , K_{sr} , C_{sf} และ C_{sr} เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีถดถอยกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำของเกาส์นิวตัน (Gauss-Newton) โดยอิงโครงสร้างแบบจำลองประมาณ 3 ระดับชั้นเสรีที่คำนึงการเคลื่อนที่เฉพาะตัวรถ (ละเลยการเคลื่อนที่ของล้อ) โดยเอาที่พู่ที่ใช้พืด มีเพียง 3 ตัวคือ X_G , θ_p , θ_r ซึ่งการทำเคิร์ฟพืดตั้งโดยอิงแบบจำลอง 3 ระดับชั้นเสรีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่จะใช้ในการทำเคิร์ฟพืดตั้งของแบบจำลอง 7 ระดับชั้นเสรี (รายละเอียดการทำเคิร์ฟพืดตั้งโดยอิงแบบจำลอง 3 ระดับเสรี อยู่ในภาคผนวก จ)

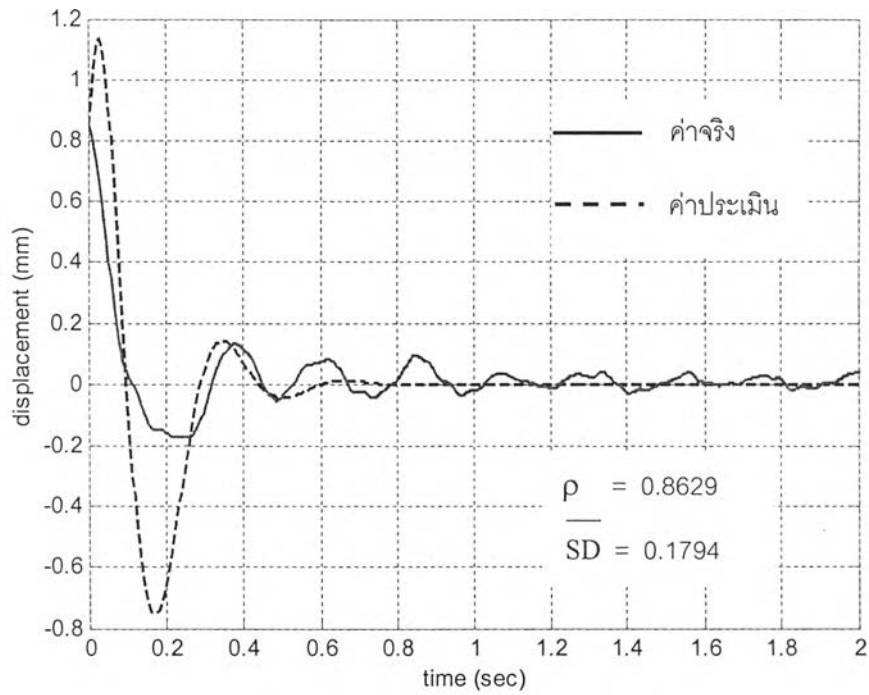
5.3.4 การคำนวณหาแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากการทำเคิร์ฟฟิตติ้งด้วยข้อมูลเอาท์พุท $X_1, X_2, X_a, \theta_a, X_G, \theta_p, \theta_r$ ด้วยระเบียบวิธีถดถอยกำลังสองน้อยสุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear least-squares regression) โดยระเบียบวิธีทำซ้ำของเกาส์นิวตัน (Gauss-Newton) ได้ผลดังรูป 5.10 - 5.16

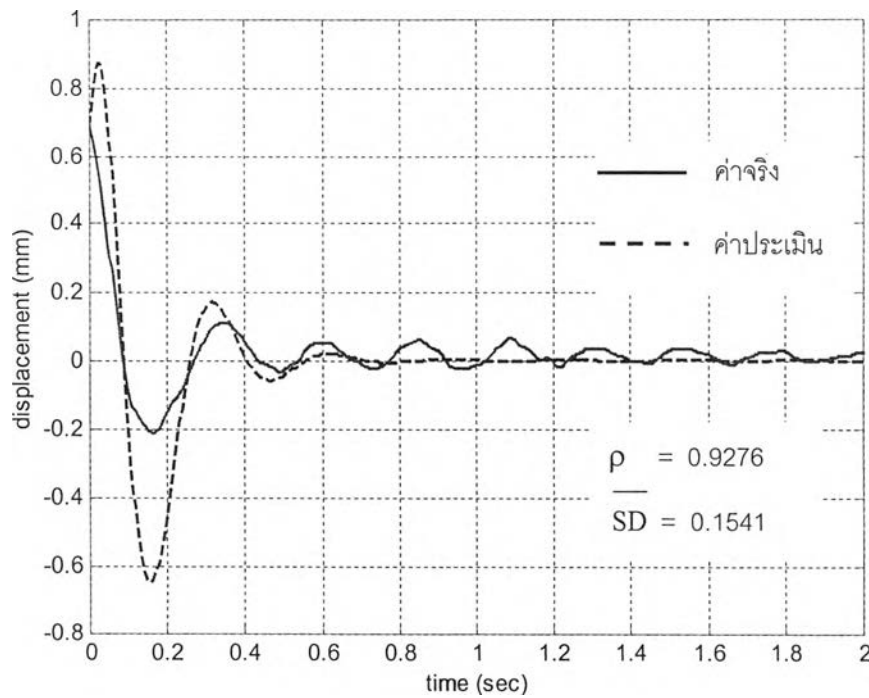
ดัชนีที่ใช้วัดความถูกต้องจะใช้ 2 ตัว ดัชนีตัวแรกคือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (simple correlation coefficient, ρ) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ว่าเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองติดตามเอาท์พุทจากการทดลองได้ดีเพียงใด (ถ้าค่าเข้าใกล้ +1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางตามกันได้ดี) สำหรับดัชนีอีกตัวคือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ถุณอร์มัลไลซ์ด้วยข้อมูลสูงสุด (SD) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (สูตรการคำนวณดัชนีทั้งสองตัว แสดงไว้ดังภาคผนวก)



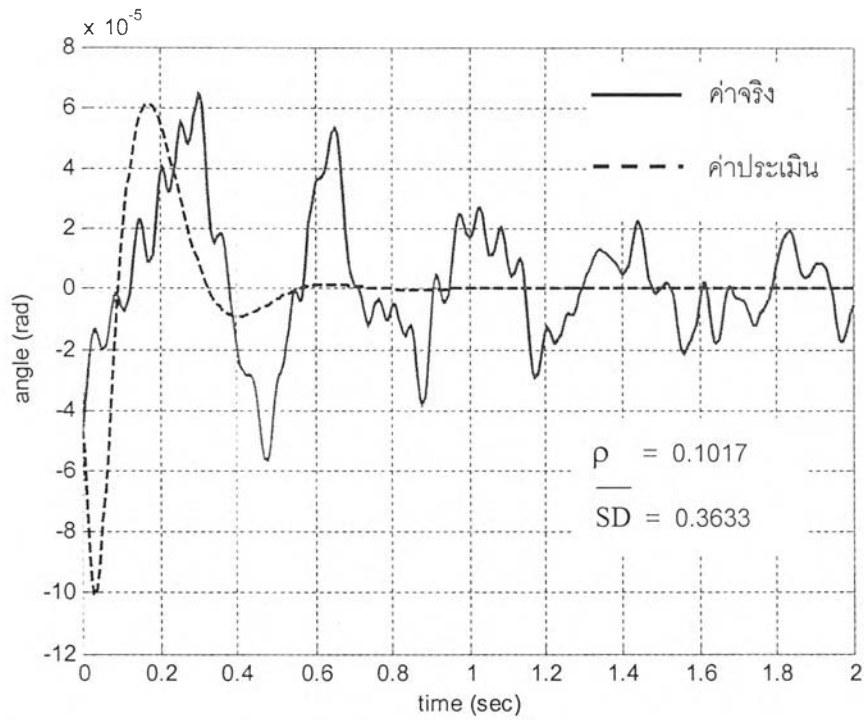
รูปที่ 5.10 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าขวา (X_1) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง



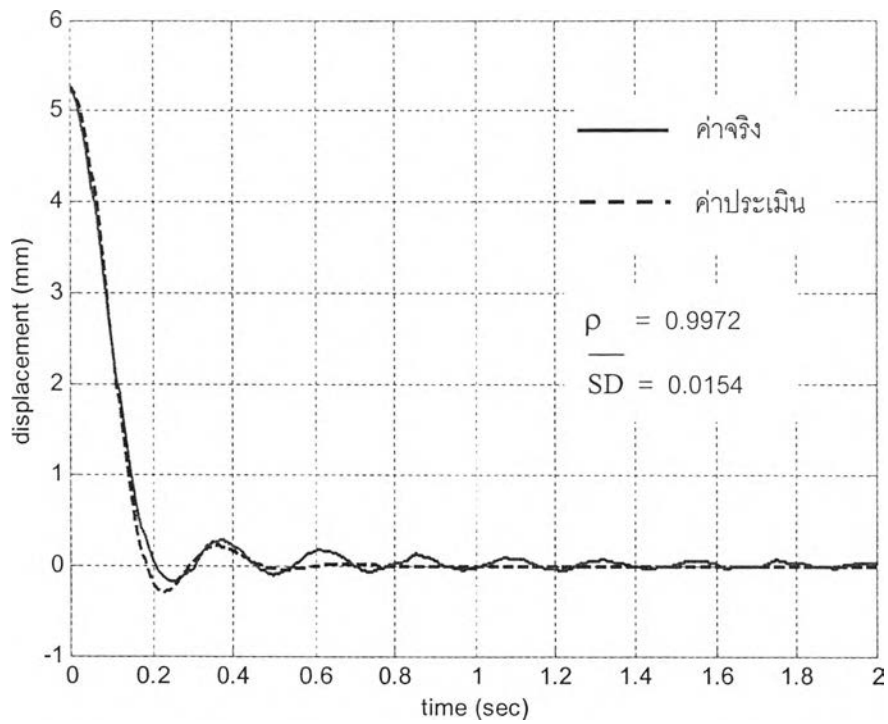
รูปที่ 5.11 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่ล้นหน้าซ้าย (X_2)
ที่ประเมินได้จากแบบจำลอง กับการทดลองจริง



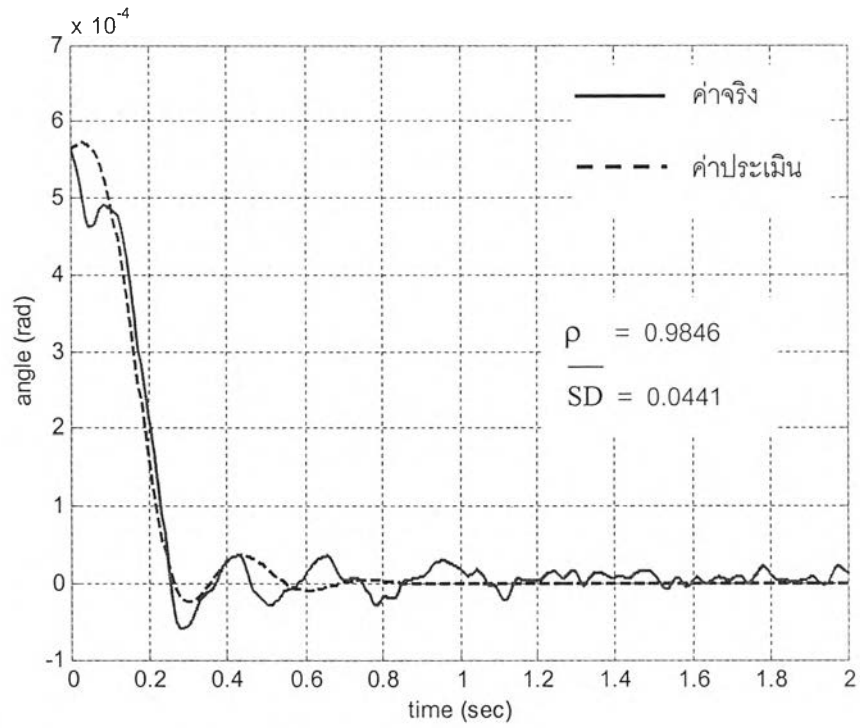
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ ณ จุดศูนย์กลางของชุดเพลาล้อหลัง (X_3)
ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง



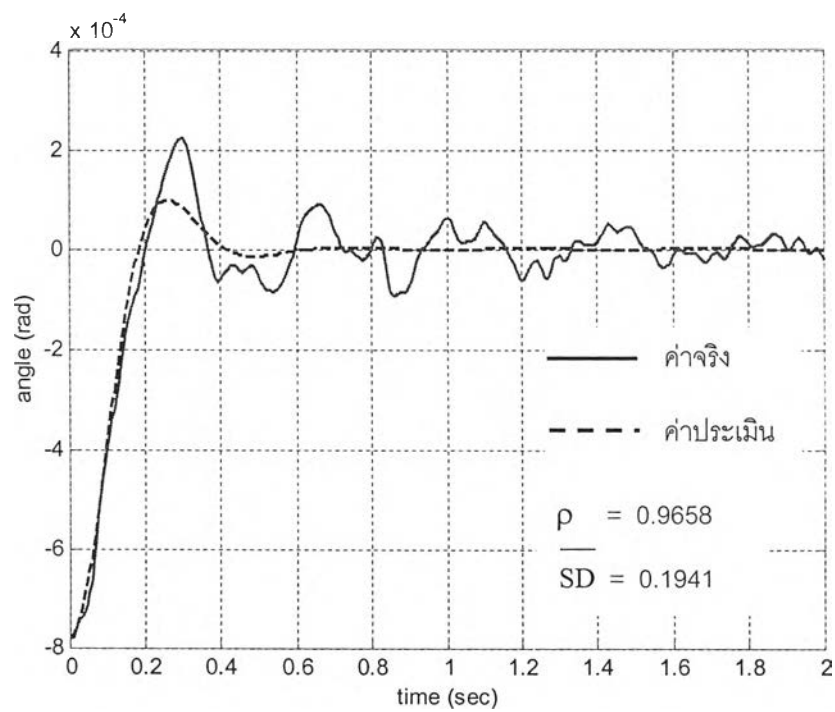
รูปที่ 5.13 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนของชุดเพลาล้อหลัง (θ_a)
ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง



รูปที่ 5.14 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ ณ จุดศูนย์กลางของมวล
ศูนย์กลาง (X_G) ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง



รูปที่ 5.15 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบกระดอน (θ_p) ของมวล ถูกแขวน ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง



รูปที่ 5.16 กราฟผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งเปรียบเทียบการหมุนแบบโคลงตัว (θ_r) ของ มวลถูกแขวน ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับการทดลองจริง

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งของแบบจำลองรถยนต์ขณะไม่มีภาระบรรทุก

เอาท์พุท	X_1	X_2	X_a	θ_a	X_G	θ_p	θ_r
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ)	0.7888	0.8629	0.9276	0.1017	0.9972	0.9846	0.9658
ความผิดพลาด (SD)	0.2604	0.1794	0.1541	0.3633	0.0154	0.0441	0.1941

อภิปรายผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้ง

จากตารางที่ 5.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในทุกๆกราฟ มีเปอร์เซ็นต์สูงพอควร นั้นแสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ประเมินได้สามารถติดตามการสั่น ณ ตำแหน่งต่างๆของรถยนต์ได้ตามกันดีกับการสั่นจริงจากการทดลอง แต่หากพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความผิดพลาด (error) ในการทำเคิร์ฟฟิตติ้ง พบว่าแบบจำลองที่ประเมินได้ ให้เอาท์พุทที่มีความผิดพลาดสูงสำหรับการสั่นตรงล้อ แต่สำหรับผลการสั่นตรงตัวรถ (มวลลูกแขวน) มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสาเหตุสำคัญน่าจะมาจากการที่โหมดการสั่นตรงล้อมีสัญญาณต่ำมาก (โดยเฉพาะโหมดการหมุนของชุดเพลาล้อหลัง (θ_a) ดังรูป 5.13) จึงทำให้สัญญาณรบกวน (noise) เข้ามามีผลมาก ข้อมูลการทดลองที่วัดได้ที่ใช้ในการทำเคิร์ฟฟิตติ้งจึงมีความน่าเชื่อถือลดลง จึงทำให้แบบจำลองฟิตผลในโหมดนั้นไม่ดี ซึ่งนี่เป็นข้อจำกัดของการให้เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นอินพุท ที่ไม่สามารถทำให้เกิดการสั่นมากได้ครบทุกโหมด

- ค่าพารามิเตอร์กายภาพที่ประเมินได้

$$I_p = 1376 \text{ kg-m}^2 \quad , \quad I_r = 250 \text{ kg-m}^2$$

$$K_{sf} = 61.759 \text{ kN/m} \quad , \quad K_{sr} = 66.901 \text{ kN/m}$$

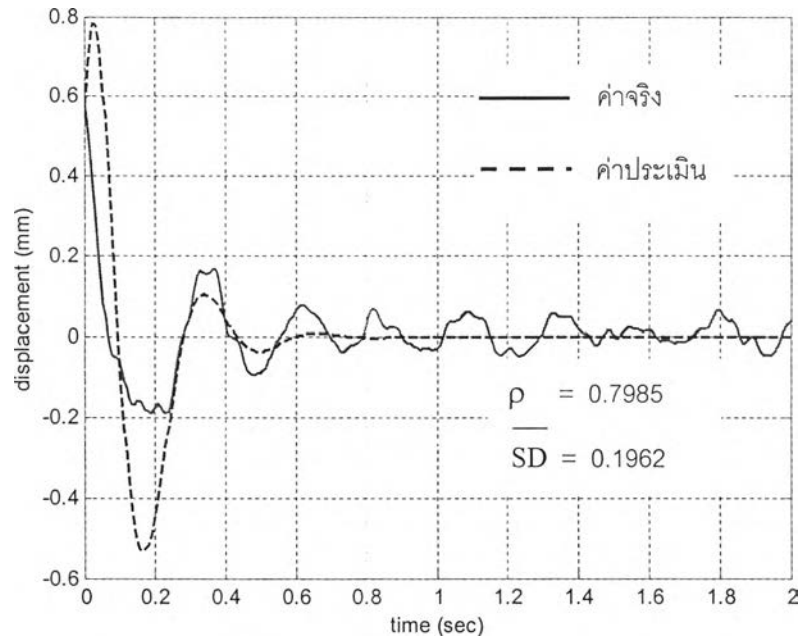
$$C_{sf} = 7.519 \text{ kN-s/m} \quad , \quad C_{sr} = 6.872 \text{ kN-s/m}$$

$$K_t = 163.124 \text{ kN/m}$$

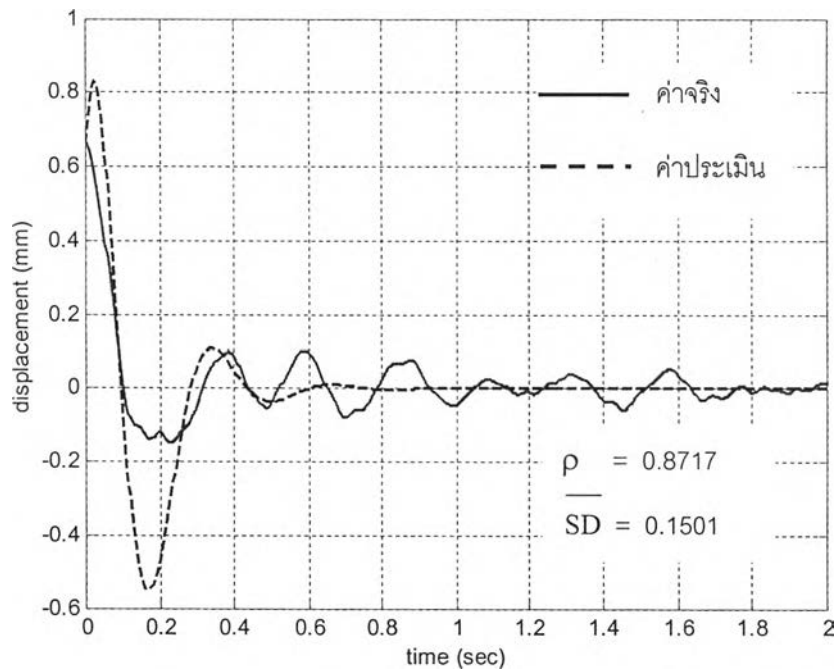
สำหรับค่าพารามิเตอร์กายภาพต่างๆที่ประเมินได้พบว่ามีค่าเหมาะสมพอควร ค่าความเฉื่อยเชิงมวลของตัวรถมีค่าเป็นไปได้ , ค่า K_{sf} , K_{sr} , C_{sf} , C_{sr} และ K_t มีค่าเป็นไปได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.1 , 4.3 , 4.5 , 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

5.3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

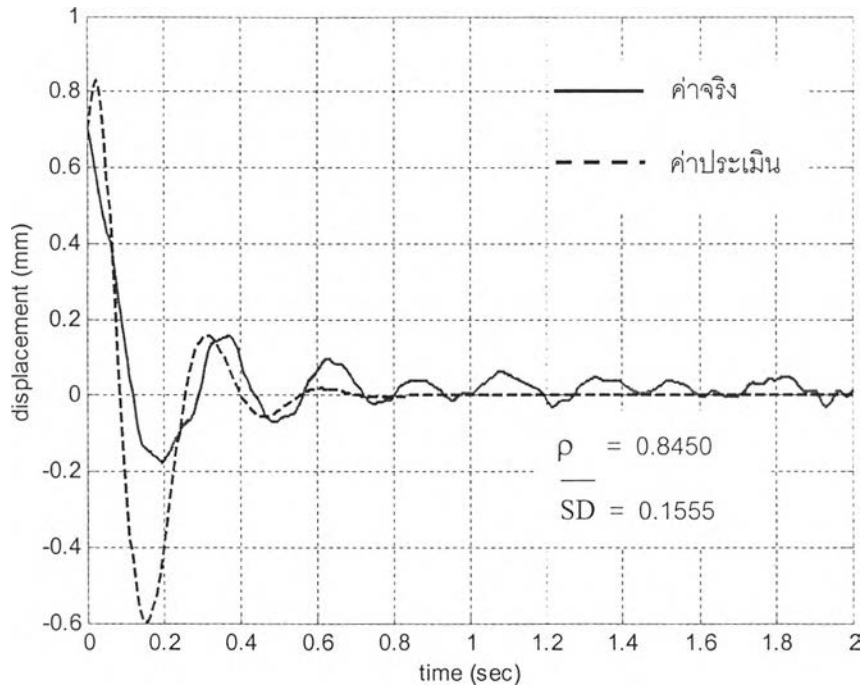
นำแบบจำลองที่ประเมินได้ ทำนายผลการตอบสนองของข้อมูลการทดลองชุดอื่น (ที่ไม่ได้ใช้คำนวณหาแบบจำลอง) โดยเปรียบเทียบตามตำแหน่งต่างๆ ที่ล้อและตัวรถ ได้ผลดังรูป 5.17 ถึง รูป 5.24



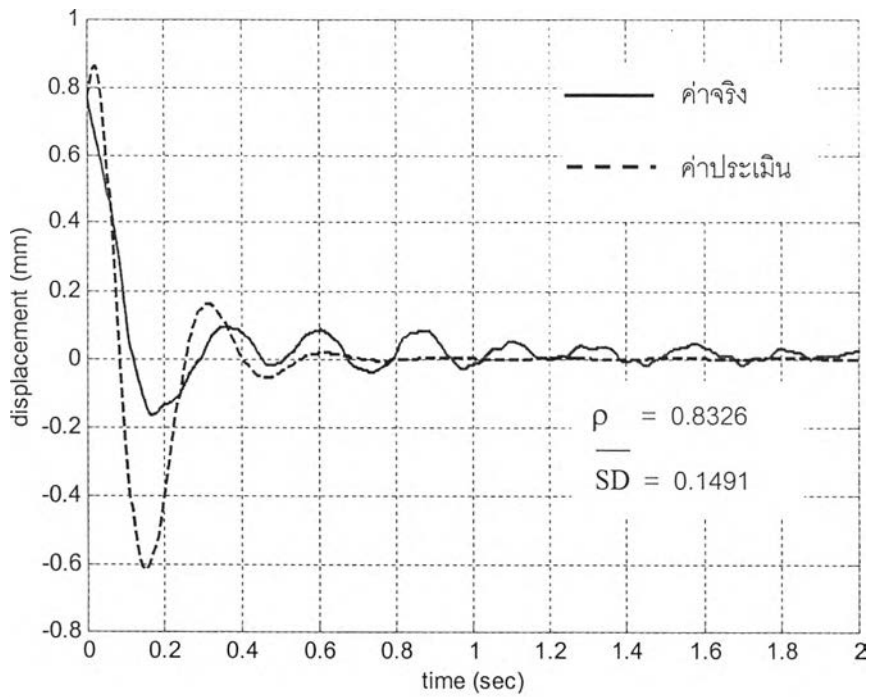
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าขวา (X_1) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



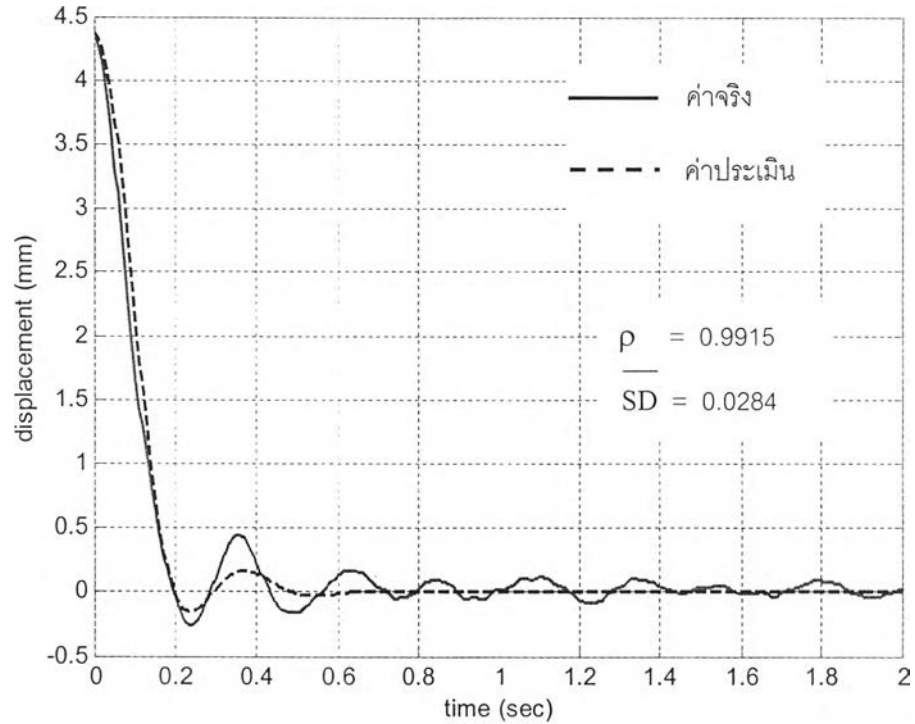
รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหน้าซ้าย (X_2) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



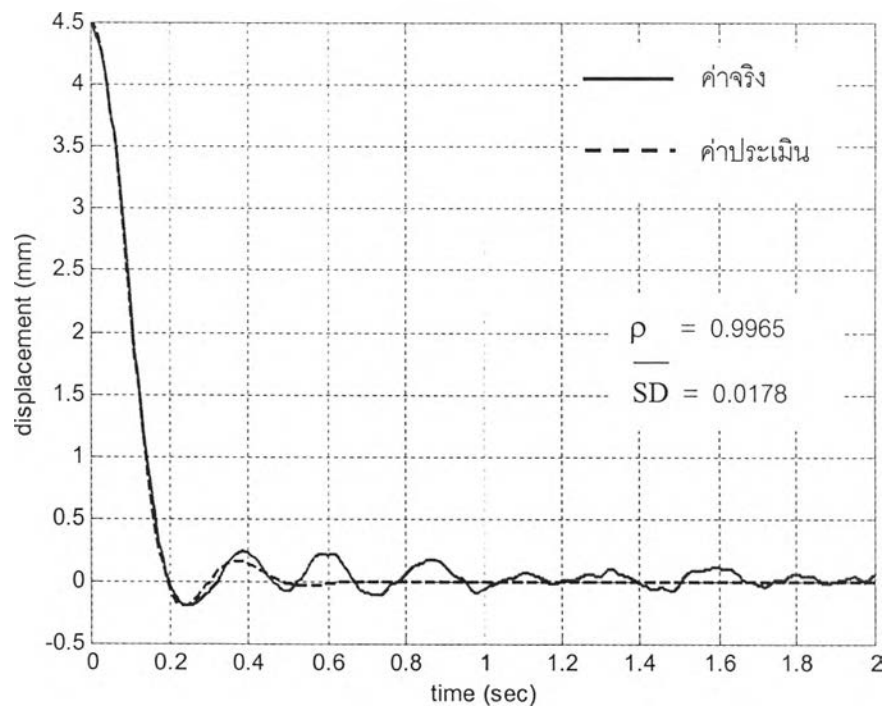
รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหลังขวา (X_3) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



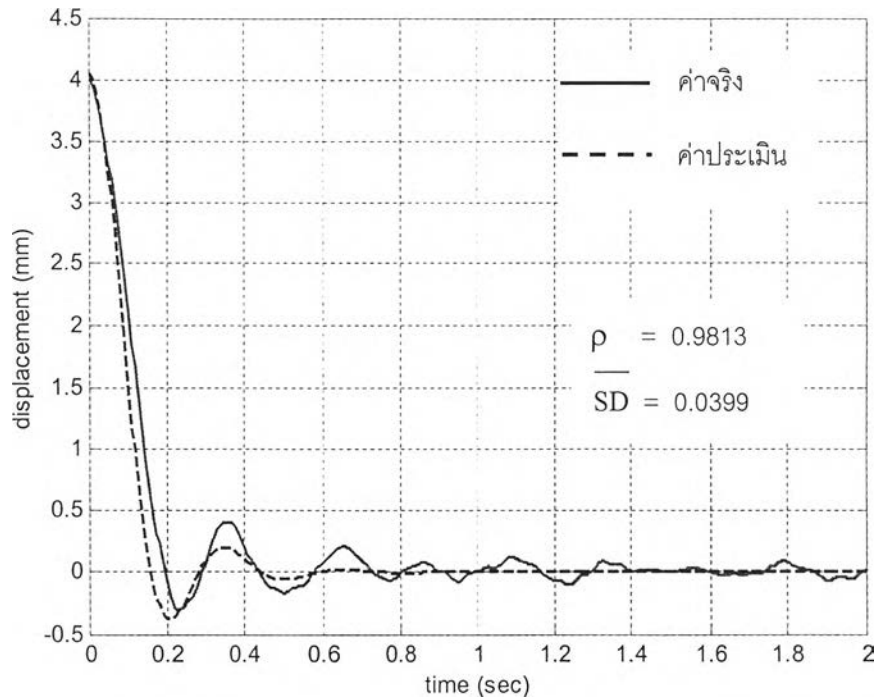
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ล้อหลังซ้าย (X_4) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับการทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



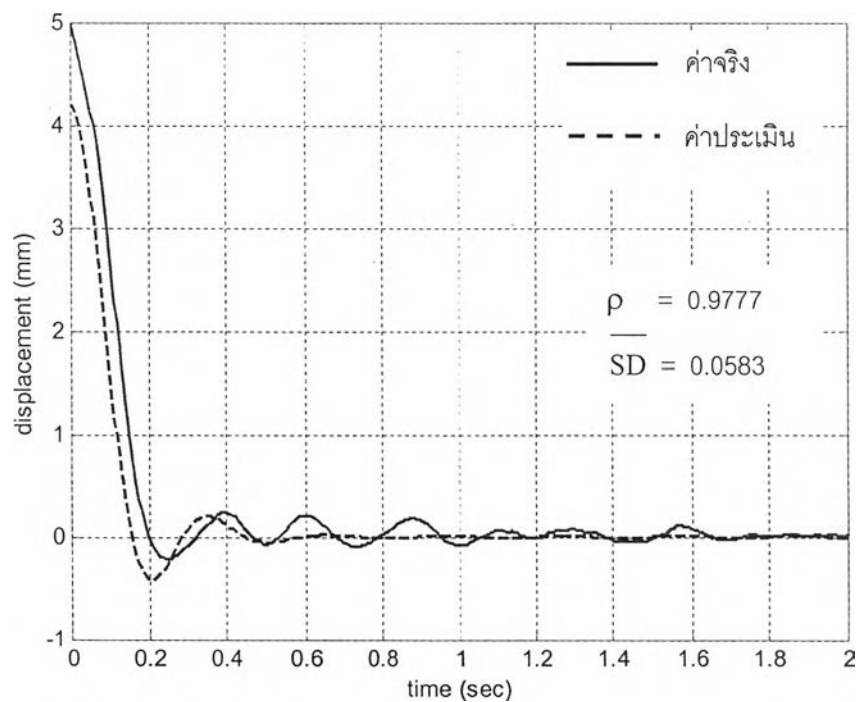
รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัววัดด้านหน้าขวา (X_5) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับ การทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัววัดด้านหน้าซ้าย (X_6) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับ การทดลองจริงที่ไม่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง



รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหลังขวา (X_7) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับ การทดลองจริงที่ไม่ใช่ในการคำนวณหาแบบจำลอง



รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ที่ตัวรถด้านหลังซ้าย (X_8) ที่แบบจำลองทำนายได้ กับ การทดลองจริงที่ไม่ใช่ในการคำนวณหาแบบจำลอง

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการนำแบบจำลองรถยนต์ที่ประเมินได้ ไปทำนายผลการสั่นกับข้อมูลการทดลองชุดอื่นที่ไม่ได้ใช้คำนวณหาแบบจำลอง

เอาต์พุต	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ)	0.7985	0.8717	0.8450	0.8326	0.9915	0.9965	0.9813	0.9777
ความผิดพลาด (SD)	0.1962	0.1501	0.1555	0.1491	0.0284	0.0178	0.0399	0.0583

จากตารางที่ 5.2 พบว่าแบบจำลองที่ประเมินได้ สามารถทำนายผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริงได้ดีพอสมควรโดยสามารถทำนายผลการสั่นที่ตัวรถได้ดีกว่าที่ตรงล้อ สำหรับสาเหตุต่างๆ ที่เป็นผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำนายผลของแบบจำลอง เช่น

- คุณลักษณะของระบบแขวนจริง แสดงลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือค่าความแข็งสปริงและค่าความหน่วงของระบบแขวนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงาน ในขณะที่แบบจำลองสมมติให้ค่าเหล่านี้คงที่ ความผิดพลาดในลักษณะนี้สังเกตได้จากกราฟเปรียบเทียบการสั่นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ผลการสั่นที่ทำนายได้จากแบบจำลองเข้าสู่สมดุลแล้ว ในขณะที่การสั่นจริงยังเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่ระบบแขวนเปลี่ยนตำแหน่งการทำงานในอีกสภาวะหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์ของระบบแขวนต่างไปจากเดิมมาก ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ทำนายการสั่นของรถยนต์ในช่วงเวลาต้นๆ ที่มีการสั่นมากพอสมควร
- ข้อจำกัดในการกระตุ้นระบบ ที่ไม่สามารถทำให้เกิดการสั่นได้มากในทุกโหมดพร้อมๆ กัน ทำให้ผลการสั่นของบางโหมดมีน้อยมาก (เช่น โหมดการหมุนของชุดเพลาล้อหลัง) เป็นผลให้ถูกสัญญาณรบกวน (noise) ได้ง่ายขณะทำการทดลองวัด ทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความถูกต้องลดลง เป็นผลให้แบบจำลองที่ประเมินได้ลดความถูกต้องลงไป
- ผลการสั่นที่เกิดขึ้นจริง เป็นผลรวมการสั่นจากการสั่นในทุกๆ โหมด ในขณะที่แบบจำลองที่คำนึงผลการสั่นหลักเพียง 7 โหมดเท่านั้น ทำให้ทำนายการสั่นได้คลาดเคลื่อนจากที่เป็นจริง

5.3.6 สรุปผลแบบจำลองที่ได้รับ

- แบบจำลองกายภาพ

แทนค่าพารามิเตอร์กายภาพที่ประเมินได้ลงในสมการ (3.11) รูปแบบจำลองกายภาพเป็นดังนี้คือ

$$[M]\{X\} + [C]\{X\} + [K]\{X\} = \{F\}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 26.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 911 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1376 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 250 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 224883 & 0 & 0 & 0 & -61759 & -70405 & -24858 \\ 0 & 224883 & 0 & 0 & -61759 & -70405 & 24858 \\ 0 & 0 & 460050 & 0 & -133802 & 179295 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 144629 & 0 & 0 & -26200 \\ -61759 & -61759 & -133802 & 0 & 257320 & -38484 & 0 \\ -70405 & -70405 & 179295 & 0 & -38484 & 400779 & 0 \\ -24858 & 24858 & 0 & -26200 & 0 & 0 & 46210 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 7519 & 0 & 0 & 0 & -7519 & -8572 & -3026 \\ 0 & 7519 & 0 & 0 & -7519 & -8572 & 3026 \\ 0 & 0 & 13744 & 0 & -13744 & 18417 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2691 & 0 & 0 & -2691 \\ -7519 & -7519 & -13744 & 0 & 28782 & -1274 & 0 \\ -8572 & -8572 & 18417 & 0 & -1274 & 44222 & 0 \\ -3026 & 3026 & 0 & -2691 & 0 & 0 & 5127 \end{bmatrix}$$

- แบบจำลองโมดัล

จากแบบจำลองกายภาพเมื่อนำมาคำนวณเป็นแบบจำลองโมดัล โดยอ้างอิงตามสมการ (3.17) จะได้รูปแบบดังนี้คือ

$$\{\eta\} + \text{diag}(-\lambda_1, -\lambda_2, \dots, -\lambda_{14}) \{\eta\} = [\Phi]^T \{q\} \quad (3.17n)$$

และ
$$\{Z\} = [\Phi] \{\eta\} \quad (3.17ข)$$

โดยที่ค่าเจาะจง λ ทั้งหมด 14 ตัว รวมทั้งเวกเตอร์เจาะจงที่ถูกลำดับไว้ด้วยมวล $\{\Phi\}$ ทั้งหมด 14 เวกเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าเงาะจงและค่าเวคเตอร์เงาะจงของแบบจำลองที่ประเมินได้

ค่าเงาะจง	โหมค	ค่าเวคเตอร์เงาะจง
-237.73	front wheel hop	$[1.9078i, 1.9078i, -0.0029i, 0, -0.1458i, -0.1106i, 0, -0.0080i, -0.0080i, 0, 0, 0.0006i, 0.0005i, 0]^T$
-12.19	front wheel hop	$[0.0261, 0.0261, -0.0002, 0, -0.0642, -0.0493, 0, -0.0021, -0.0021, 0, 0, 0.0053, 0.0040, 0]^T$
-213.40	front wheel tramp	$[-1.9196i, 1.9196i, 0, -0.1740i, 0, 0, 0.2398i, 0.0090i, -0.0090i, 0, 0.0008i, 0, 0, -0.0011i]^T$
-21.49	front wheel tramp	$[-0.1458, 0.1458, 0, -0.0907, 0, 0, 0.2834, 0.0068, -0.0068, 0, 0.0042, 0, 0, -0.0132]^T$
-147.56	rear wheel hop	$[0.0049i, 0.0049i, 1.2192i, 0, -0.1476i, 0.01303i, 0, 0, 0, -0.0083i, 0, 0.0010i, 0.0009i, 0]^T$
-15.24	rear wheel hop	$[0.0011, 0.00105, 0.0433, 0, -0.0731, 0.0620, 0, 0, 0, -0.0028, 0, 0.0048, -0.0041, 0]^T$
-53.91+44.65i	rear wheel tramp	$[0.109-0.121i, -0.109+0.121i, 0, -0.082+1.408i, 0, 0, 0.118-0.161i, -0.002+0.0003i, 0, 0.014-0.015i, 0, 0, -0.003+0.0007i]^T$
-53.91-44.65i	rear wheel tramp	$[0.109+0.121i, -0.109-0.121i, 0, -0.082-1.408i, 0, 0, 0.118+0.161i, -0.002-0.0003i, 0, 0.014+0.015i, 0, 0, -0.003-0.0007i]^T$
-7.44+20.87i	body pitch	$[-0.003+0.008i, -0.003+0.008i, -0.138i, 0, -0.061-0.58i, 0.058+0.060i, 0, 0.0004, 0.0004, -0.006+0.002i, 0, -0.001+0.003i, 0.002-0.003i]^T$
-7.44-20.87i	body pitch	$[-0.003-0.008i, -0.003-0.008i, +0.138i, 0, -0.061+0.58i, 0.058-0.060i, 0, 0.0004, 0.0004, -0.006-0.002i, 0, -0.001-0.003i, 0.002+0.003i]^T$
-7.88+19.53i	body bounce	$[0.009-0.127i, 0.009-0.127i, 0.003-0.007i, 0, -0.069-0.076i, -0.048-0.048i, 0, -0.006+0.002i, 0, 0, -0.002+0.004i, -0.001+0.003i, 0]^T$
-7.88-19.53i	body bounce	$[0.009+0.127i, 0.009+0.127i, 0.003+0.007i, 0, -0.069+0.076i, -0.048+0.048i, 0, -0.006-0.002i, 0, 0, -0.002-0.004i, -0.001-0.003i, 0]^T$
-8.08+13.59i	body roll	$[-0.031+0.046i, 0.031-0.046i, 0, -0.052+0.054i, 0, 0, 0.106+0.228i, 0.003+0.0001i, -0.003-0.0001i, 0, 0.004+0.001i, 0, 0, 0.009-0.013i]^T$
-8.08-13.59i	body roll	$[-0.031-0.046i, 0.031+0.046i, 0, -0.052-0.054i, 0, 0, 0.106-0.228i, 0.003-0.0001i, -0.003+0.0001i, 0, 0.004-0.001i, 0, 0, 0.009+0.013i]^T$

เมื่อนำค่าเวกเตอร์เจาะจงคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติที่ถูกหน่วง (damped natural frequency, ω_d) ความถี่ธรรมชาติที่ไม่ถูกหน่วง (undamped natural frequency, ω_n) และอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio, ξ) สำหรับการสั่นในแต่ละโหมดได้ผลดังตารางที่ 5.4 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 5.4 ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนการหน่วงสำหรับการสั่นในแต่ละโหมด

โหมดการสั่น	ω_d (Hz)	ω_n (Hz)	ξ
front wheel hop	-	8.57	2.32
front wheel tramp	-	10.78	1.73
rear wheel hop	-	7.55	1.71
rear wheel tramp	7.11	11.14	0.77
body pitch	3.32	3.53	0.33
body bounce	3.11	3.35	0.37
body roll	2.16	2.51	0.51

จากตารางที่ 5.4 พบว่าโหมดการสั่น front wheel hop, front wheel tramp และ rear wheel hop เป็นการสั่นแบบสูงกว่ำวิกฤต (overdamped) ส่วนการสั่น 4 โหมดที่เหลือ เป็นการสั่นแบบต่ำกว่ำวิกฤต (underdamped) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการสั่นของระบบภายใต้ความหน่วงที่สูงพอสมควร ซึ่งค่าพารามิเตอร์โมดัลที่ได้นี้เป็นการสั่นภายใต้สภาวะการทดลอง ซึ่งสามารถเทียบได้กับการที่ขับรถผ่านเนินหรือหลุมที่มีขนาดใหญ่พอสมควร

5.4 ผลของภาระบรรทุกที่มีต่อแบบจำลอง

เมื่อรถยนต์มีภาระบรรทุกจะทำให้ค่าพารามิเตอร์บางตัวของแบบจำลองเปลี่ยนไป เมื่อทำการทดลองเพิ่มน้ำหนักบรรทุกด้านหลังรถ 80 kg (บนกึ่งกลางท้ายกระบะ) และน้ำหนักบรรทุกด้านหน้า 100 kg (บนที่นั่งผู้โดยสารหน้ารถ ช้างละ 50 kg เพื่อแทนน้ำหนักของผู้โดยสาร) แล้วทำการทดลองเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งต่างๆ ของตัวรถและล้อรถ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการเดียวกันกับหัวข้อ 5.3 โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองขณะที่มีภาระบรรทุกเป็นดังนี้

- พารามิเตอร์ที่ทราบค่า

$$- M_e = 95 \text{ kg} , M_w = 32 \text{ kg} , L_t = 1.205 \text{ m} , L_c = 0.805 \text{ m} ,$$

$$L_s = 0.885 \text{ m} , I_a = 26.03 \text{ kg-m}^2 , K_t = 163.124 \text{ kN/m}$$

(พารามิเตอร์เหล่านี้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากแบบจำลองตอนไม่มีภาวะบรรทุก)

$$- M_D = 911 \text{ kg} + 180 \text{ kg} = 1091 \text{ kg}$$

$$I_p = 1376 \text{ kg-m}^2 + 64 \text{ kg-m}^2 = 1440 \text{ kg-m}^2$$

$$I_r = 250 \text{ kg-m}^2 + 9 \text{ kg-m}^2 = 259 \text{ kg-m}^2$$

$$L_f = 1.22 \text{ m} , L_r = 1.26 \text{ m}$$

(L_f และ L_r มีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตำแหน่งจุด cg. ของมวลถูกแขวนเปลี่ยนแปลงไป สำหรับ I_p และ I_r มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลของภาวะบรรทุก โดยคำนวณความเฉื่อยเชิงมวลที่เพิ่มขึ้นได้จากสูตร $I = mr^2$ และจากสูตรการเลื่อนแกนทางขนาน (parallel axis theorem) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ง

- พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

เมื่อรถยนต์มีภาวะบรรทุก ระบบแขวนจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งการทำงาน จึงทำให้ค่า K_{sf} , K_{sr} , C_{sf} และ C_{sr} มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยการทำให้ครีฟฟิตตั้งด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.3 โดยปรับหาค่า K_{sf} , K_{sr} , C_{sf} และ C_{sr} เพื่อให้แบบจำลองพิตผลการทดลองได้ดีที่สุด พบว่าได้ผลการทำให้ครีฟฟิตตั้งดังนี้คือ

ตารางที่ 5.5 ตารางสรุปผลการทำเคิร์ฟฟิตติ้งของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุก 180 kg
(เปรียบเทียบกับแบบจำลองขณะรถยนต์ไม่มีภาระบรรทุก)

เอาท์พุท	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ)		ค่าความผิดพลาด (\overline{SD})	
	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก
X_1	0.7888	0.5489	0.2604	0.4553
X_2	0.8629	0.9343	0.1794	0.1413
X_a	0.9276	0.9343	0.1541	0.1436
θ_a	0.1017	0.2018	0.3633	0.3327
X_G	0.9972	0.9983	0.0154	0.0143
θ_p	0.9846	0.9279	0.0441	0.1187
θ_r	0.9658	0.7330	0.1941	0.2628

ตารางที่ 5.6 ตารางสรุปผลการนำแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุก 180 kg ที่ประเมินได้
ไปทำนายผลการสั่นกับข้อมูลการทดลองชุดอื่นที่ไม่ได้ใช้คำนวณหาแบบจำลอง
(เปรียบเทียบกับแบบจำลองขณะรถยนต์ไม่มีภาระบรรทุก)

เอาท์พุท	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ)		ค่าความผิดพลาด (\overline{SD})	
	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก
X_1	0.7985	0.6533	0.1962	0.3075
X_2	0.8717	0.8295	0.1501	0.1579
X_3	0.8450	0.9222	0.1555	0.1233
X_4	0.8326	0.9112	0.1491	0.1191
X_5	0.9915	0.9885	0.0284	0.0436
X_6	0.9965	0.9864	0.0178	0.0425
X_7	0.9813	0.9793	0.0399	0.0523
X_8	0.9777	0.9954	0.0583	0.0404

จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 สรุปได้ว่าแบบจำลองที่ประเมินได้ขณะรถยนต์มีภาระบรรทุกมีความถูกต้องใกล้เคียงกันกับแบบจำลองที่ประเมินได้ขณะรถยนต์มีภาระบรรทุก นั่นคือสามารถทำนายผลการสั่นตรงตัวรถได้ดีกว่าผลการสั่นตรงล้อ

- ค่า K_{sf} , K_{sr} , C_{sf} และ C_{sr} ที่ประเมินได้คือ

$$K_{sf} = 46.129 \text{ kN/m} , \quad K_{sr} = 73.299 \text{ kN/m}$$

$$C_{sf} = 8.253 \text{ kN-s/m} , \quad C_{sr} = 6.326 \text{ kN-s/m}$$

สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีค่าเปลี่ยนค่าไปจากเดิมขณะที่แบบจำลองไม่มีภาระบรรทุกได้ผลดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กายภาพของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุกเพิ่มขึ้น 180 kg กับขณะไม่มีภาระบรรทุก

พารามิเตอร์ กายภาพ	ขณะรถยนต์ไม่มี ภาระบรรทุก	ขณะรถยนต์มี ภาระบรรทุก	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง
M_b (kg)	911	1091	+20 %
L_f (m)	1.14	1.22	+7%
L_r (m)	1.34	1.26	-6%
I_p (kg-m ²)	1376	1440	+5%
I_r (kg-m ²)	250	259	+4%
K_{sf} (kN/m)	61.759	46.129	-25%
K_{sr} (kN/m)	66.901	73.299	+10%
C_{sf} (kN-s/m)	7.519	8.253	+10%
C_{sr} (kN-s/m)	6.872	6.326	-8%

จากตารางที่ 5.7 พบว่าเมื่อเพิ่มภาระบรรทุก (ภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่ทำการทดลอง) ค่าความแข็งสปริงของระบบแขวนด้านหน้ามีค่าลดลง และความแข็งสปริงระบบแขวนด้านหลังเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับการทดลองในหัวข้อ 4.2

สำหรับค่าความหน่วงระบบแขวนด้านหน้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมและค่าความหน่วงของระบบแขวนด้านหลังลดลงจากเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความหน่วงนี้เกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุคือ

- 1) การทดลองเก็บข้อมูลขณะรถยนต์ไม่มีภาระบรรทุกและมีภาระบรรทุก ให้การเคลื่อนที่เริ่มต้นที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ค่าความหน่วงของโช้คอัพซอร์บเบอร์ไม่เท่าเดิมเนื่องจากทำงานในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน
- 2) ข้อมูลที่ใช้ในการทำเคิร์ฟฟิตติ้งไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวน

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์กายภาพคำนวณพารามิเตอร์โมดัลเพื่อเปรียบเทียบผลของภาระบรรทุกที่มีต่อพารามิเตอร์โมดัล ได้ผลดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ตารางเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนการหน่วงในแต่ละโหมดของแบบจำลองรถยนต์ขณะมีภาระบรรทุกเพิ่มขึ้น 180 kg กับขณะไม่มีภาระบรรทุก

โหมดการสั่น	ω_d (Hz)		ω_n (Hz)		ξ	
	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก	ไม่มีภาระ	มีภาระบรรทุก
front wheel hop	-	-	8.57	6.89 (-20%)	2.32	3.17 (+37%)
front wheel tramp	-	-	10.78	9.82 (-9%)	1.73	2.09 (+21%)
rear wheel hop	-	-	7.55	8.82 (+17%)	1.71	1.32 (-23%)
rear wheel tramp	7.11	8.21 (+15%)	11.14	11.37 (+2%)	0.77	0.69 (-10%)
body pitch	3.32	3.33 (+0.3%)	3.53	3.58 (+1%)	0.33	0.35 (+6%)
body bounce	3.11	2.66 (-14%)	3.35	2.86 (-15%)	0.37	0.36 (-3%)
body roll	2.16	2.21 (2%)	2.51	2.54 (+1%)	0.51	0.50 (-2%)

จากตารางที่ 5.8 พบว่าเมื่อเพิ่มภาระบรรทุก (ภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่ทำการทดลอง) ค่าพารามิเตอร์โมดัลของโหมดการสั่นต่างๆมีค่าเปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์กายภาพแม้เพียงบางตัวแต่ก็จะส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์โมดัลทั้งหมด อย่างไรก็ตามค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่ประเมินได้ขณะที่รถมีภาระบรรทุกคงที่ค่าหนึ่งภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่ทำการทดลองเท่านั้น