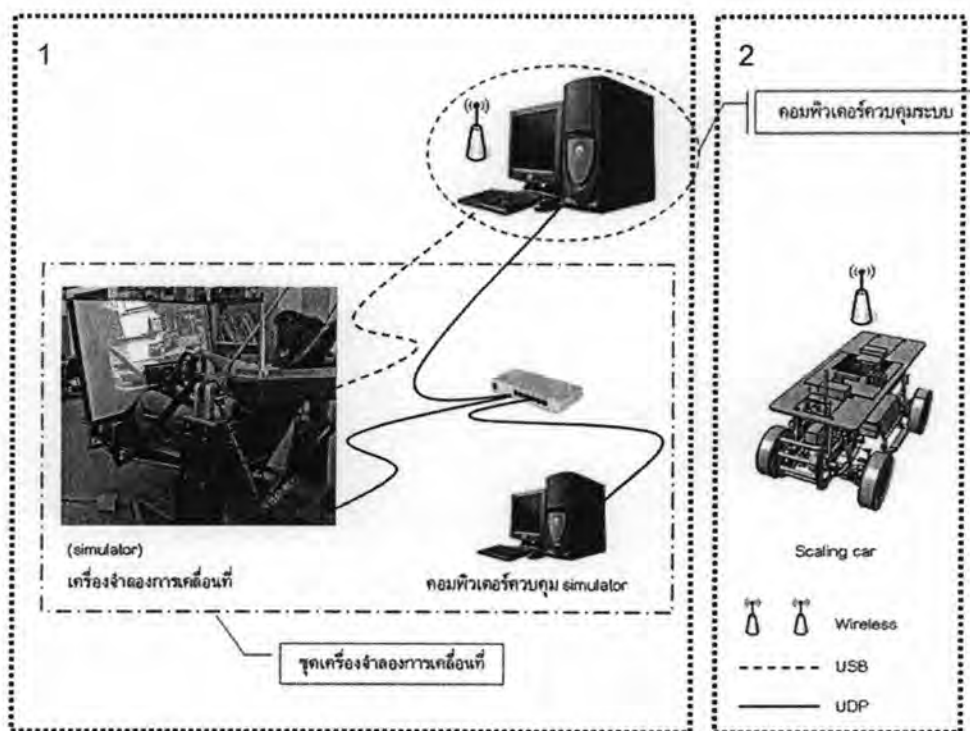


บทที่ 9

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเพื่อให้มีความสมมูลทางพลศาสตร์กับยานพาหนะจริงนั้น อ้างอิงมาจากการวิจัยของ John T. Cameron [27] เนื่องจากการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบยานพาหนะจริงในกรณีวิ่งเปลี่ยนเลนส์และซิกแซก โดยที่บนยานพาหนะจริงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อบันทึกค่าพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น แล้วนำข้อมูลที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณจากสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ ผลจากการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีแนวโน้มเดียวกัน แสดงว่าสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ สามารถทำนายลักษณะพลศาสตร์ของยานพาหนะจริงได้อย่างถูกต้องภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบคล้ายกับงานวิจัยของ Cameron แต่แตกต่างกันตรงที่เปลี่ยนจากยานพาหนะจริงเป็นยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนที่ได้พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ 9.1 ระบบการควบคุมยานพาหนะ (ภาพขวา) และจากผู้ควบคุมภายนอก (ภาพซ้าย)

จากรูปที่ 9.1 เป็นการทำงานทั้งระบบของการควบคุมยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน สำหรับเงื่อนไขในการทดลอง ในระบบนี้ ได้ออกแบบให้ใช้คำสั่งในการควบคุมยานพาหนะด้วยความเร็วคงที่ เพื่อให้เป็นไปตามหลักการของสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ และในระหว่างทำการทดสอบโปรแกรมได้ถูกออกแบบให้การทำงานพร้อมกันในส่วนของการเปรียบเทียบความ

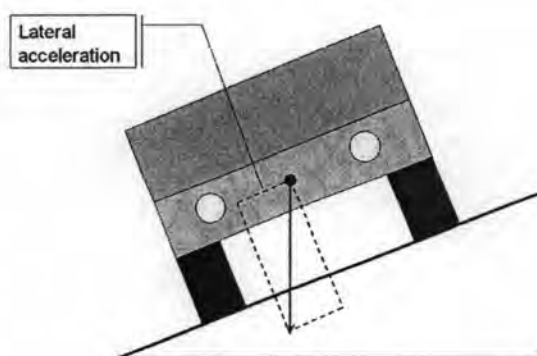
สมมูลทางพลศาสตร์ของยานพาหนะ คือ ข้อมูลที่ได้จากยานพาหนะจะส่งเข้าไปยังผู้ควบคุมภายนอกโดยระหว่างนั้นโปรแกรมควบคุมจากภายนอกจะนำค่าที่เกิดขึ้นบนตัวยานพาหนะไปทำการคำนวณทางสมการทางคณิตศาสตร์ ตามแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะที่กำหนดไว้ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นในการทดลองสามารถแสดง ค่าความสมมูลของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนจากการคำนวณผ่านสมการพลศาสตร์ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ และค่าที่เกิดขึ้นบนตัวยานพาหนะ โดยการทำงานผ่านโปรแกรม Visual basic ในเวลาจริง รอบการทำงานระหว่างผู้ควบคุมและยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนออกแบบให้ระบบทำงานภายใต้อัตรารับ-ส่งข้อมูลที่ความไว 100Hz

9.1 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

ก่อนทำการทดสอบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนในการจำลองทางพลศาสตร์ ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะ โดยทดสอบในสภาวะที่ยานพาหนะหยุดนิ่งและสภาวะการเคลื่อนที่

9.1.1 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะหยุดนิ่ง

การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะหยุดนิ่ง ทำโดยการนำยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนวางบนพื้นเอียงที่ทำการกำหนดขนาดมุมไว้ที่แน่นอน หลังจากนั้นนำข้อมูลความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน ทำการแปลงข้อมูลให้เป็นหน่วยของมุม แล้วทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างขนาดมุมที่กำหนดและที่อ่านค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น การทดสอบกำหนดให้ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนวางอยู่บนพื้นเอียงขนาด 8 องศา และทำการอ่านข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีค่าเท่ากับ 8 องศา ซึ่งมีค่ามุมเอียงเท่ากับค่าที่กำหนด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความถูกต้องในการอ่านค่าในสภาวะหยุดนิ่ง



รูปที่ 9.2 การทดสอบวางยานพาหนะบนพื้นเอียง

9.1.2 การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะเคลื่อนที่

ทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจวัดในสภาวะเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นทางวงกลมด้วยความเร็วคงที่ และนำข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะในส่วนของข้อมูลความเร่งด้านข้างและข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z เปรียบเทียบกับข้อมูลที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี โดยข้อมูลความเร่งด้านข้างสามารถคำนวณหาได้จากสมการ 9.1 และความเร็วเชิงมุมรอบแกน z สามารถคำนวณได้จากสมการ 9.2

$$a_y = \frac{V^2}{R} \quad (9.1)$$

$$\omega_z = \frac{V}{R} \quad (9.2)$$

เมื่อกำหนดให้

V หมายถึง ความเร็วเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

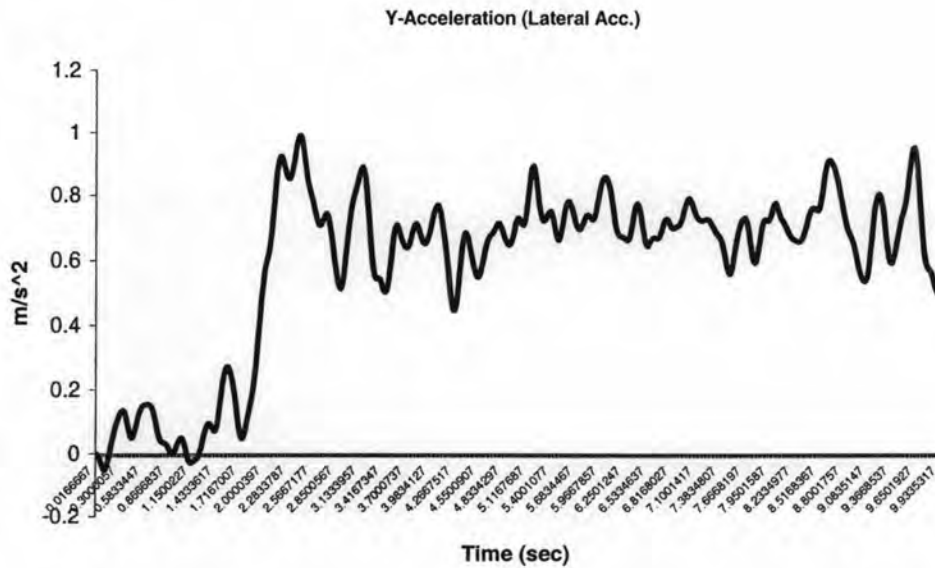
R หมายถึง รัศมีของเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

การทดสอบโดยควบคุมขั้วยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 0.8m/s แล้วควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ให้เป็นแบบวงกลม หลังจากนั้นทำการจึงวัดขนาดรัศมีของวงกลมที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 0.8m นำค่ารัศมีที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 9.1-9.2 และนำข้อมูลความเร่งด้านข้างจากรูปที่ 9.3 กับข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z จากรูปที่ 9.4 ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะมาเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้เป็นดังตารางที่ 9.1

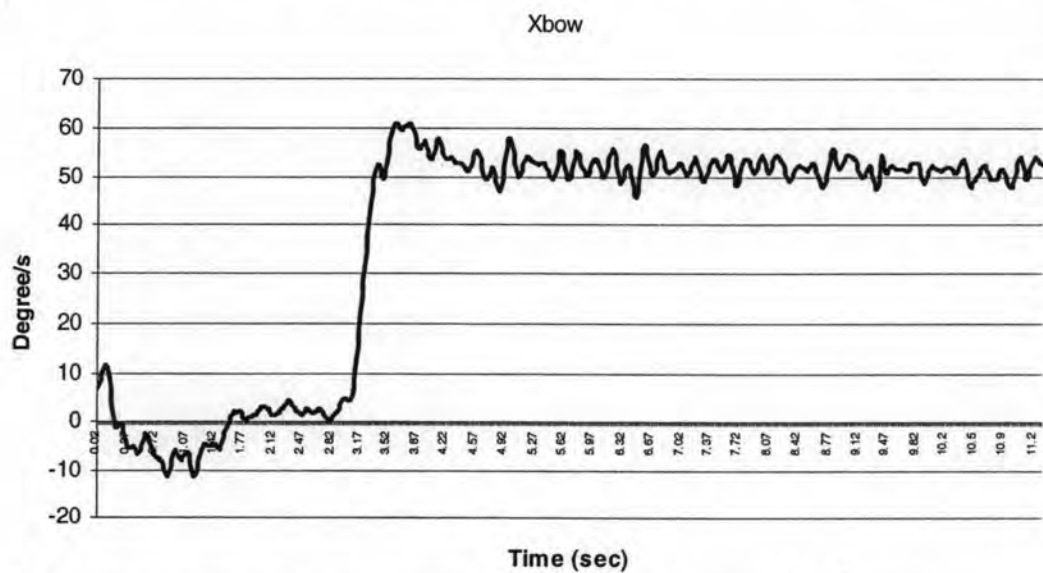
ตารางที่ 9.1 เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดและการคำนวณ

	ข้อมูลการคำนวณ	ข้อมูลเซนเซอร์	ค่าความผิดพลาด
ความเร่งด้านข้าง	0.8 m/s^2	0.725 m/s^2	9.3 %
ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z	57.32 Deg/s	55 Deg/s	4 %

ข้อมูลจากตารางที่ 9.1 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดและข้อมูลจากการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่าค่าข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะมีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกันกับการคำนวณ



รูปที่ 9.3 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ได้จากเซนเซอร์ขณะเคลื่อนที่เป็นวงกลม

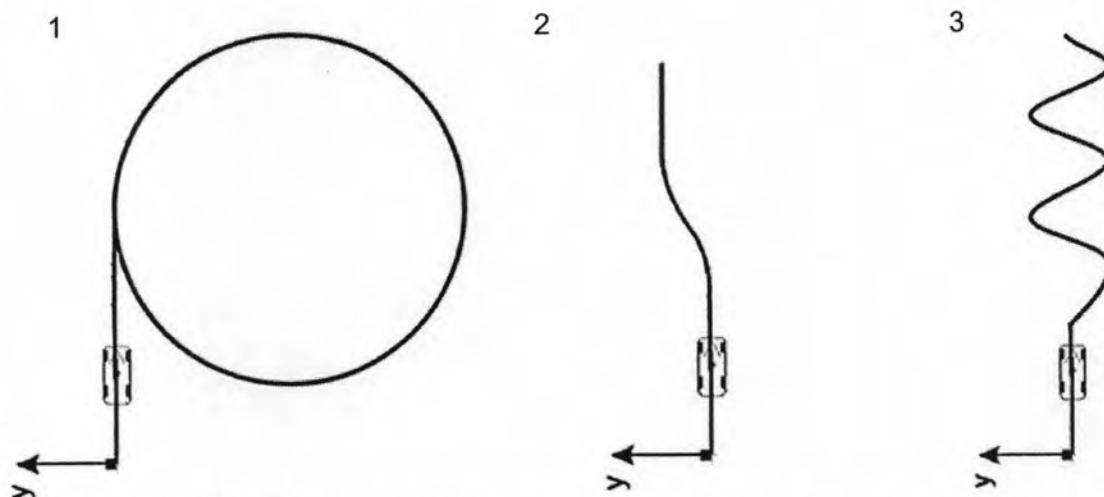


รูปที่ 9.4 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ได้จากเซนเซอร์ขณะเคลื่อนที่เป็นวงกลม

9.2 การทดสอบความสมมูลทางพลศาสตร์ของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

การทดสอบความสมมูลทางพลศาสตร์ของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนนั้น จะกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในการทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขแบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ โดยใช้ความเร็วคงที่ในการเคลื่อนที่ และมุมลื่นไถลที่ล้อหน้าในการหักเลี้ยวไม่เกิน 10 องศา สำหรับเส้นทางการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 เส้นทาง ดังนี้

1. ทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลม
2. ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์
3. ทดสอบการเคลื่อนที่แบบซิกแซ็ก



รูปที่ 9.5 ลักษณะเส้นทางทดสอบของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

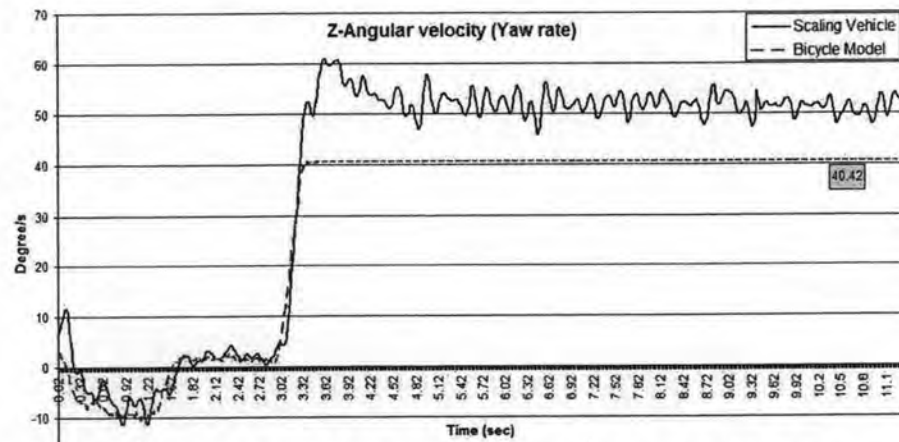
9.2.1 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลม

ในการควบคุมยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนให้เคลื่อนที่เป็นวงกลมจะเริ่มจากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่แล้วจึงหมุนมุมเล็กน้อยในลักษณะมุมคงที่ โดยความเร็วที่ใช้จะเป็นระดับจากความเร็วระดับช้า ($V=0.8\text{m/s}$) ระดับกลาง ($V=1.35\text{m/s}$) และระดับสูง ($V=2.0\text{m/s}$) โดยจากการทดสอบเมื่อนำข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเปรียบเทียบกับผลข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลอง ผลที่ได้มีดังนี้ (โดยข้อมูลจากรูปภาพ เส้นประหมายถึงข้อมูลจากการคำนวณ และเส้นทึบหมายถึงข้อมูลจากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน)

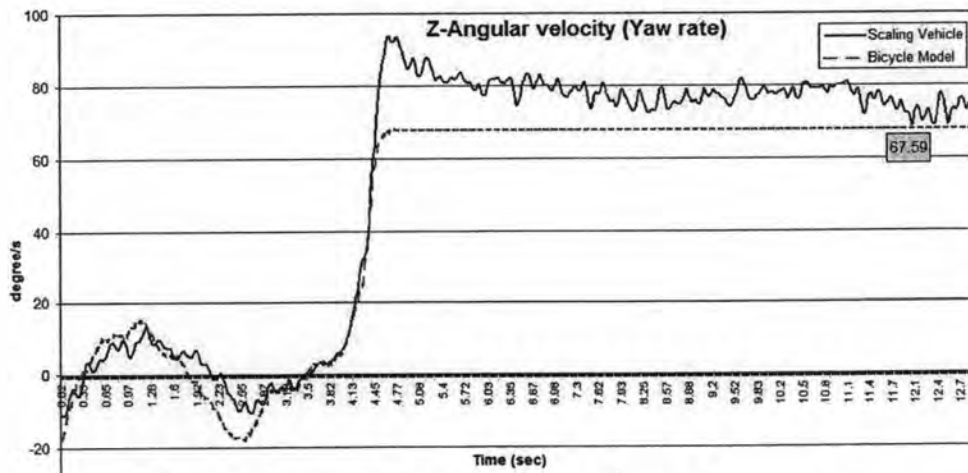


รูปที่ 9.6 การทดสอบเคลื่อนที่แบบวงกลม

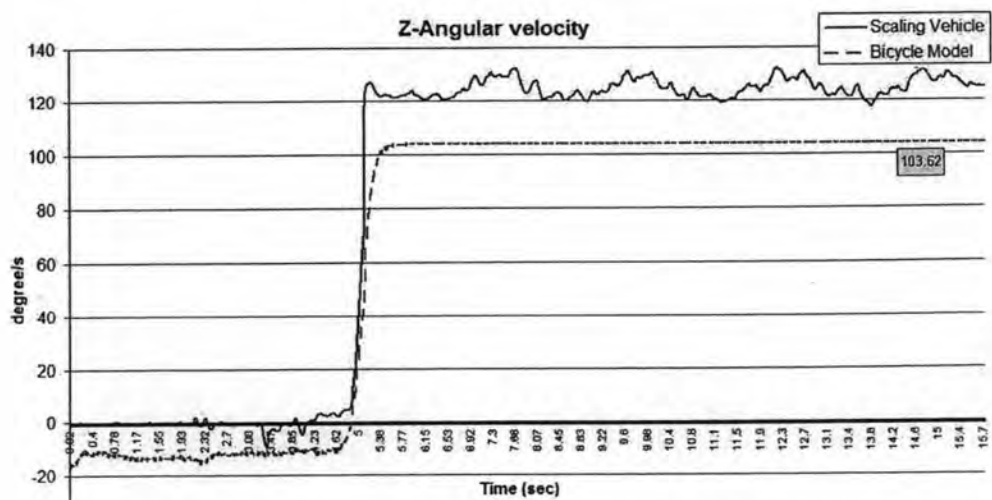
ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.7 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$

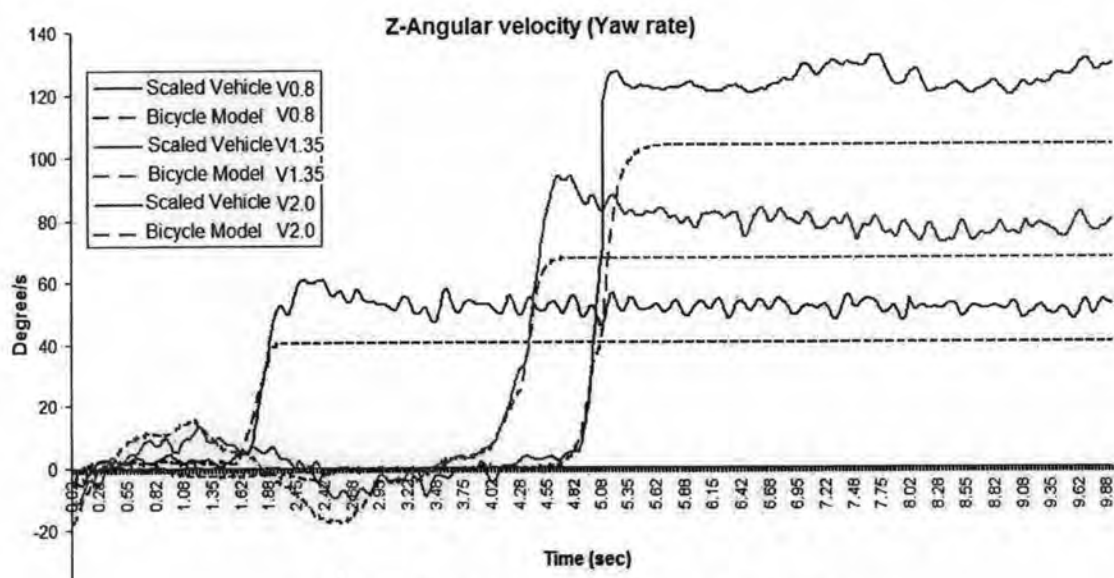


รูปที่ 9.8 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.9 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$

เมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะได้ผลดังนี้



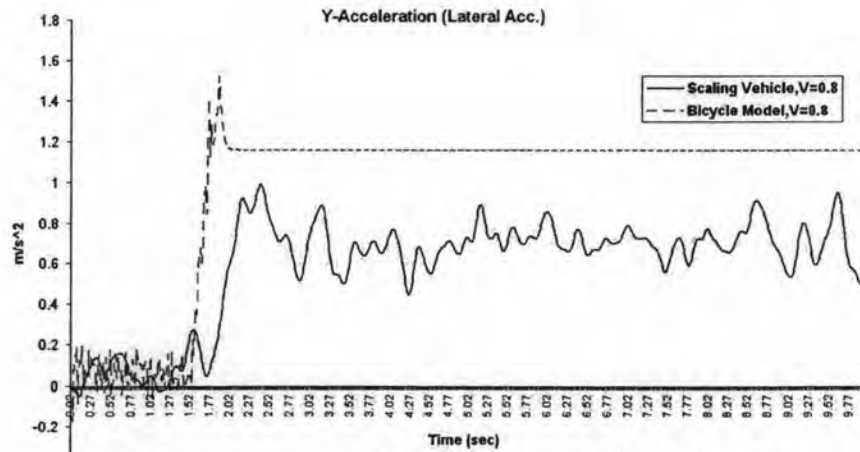
รูปที่ 9.10 ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z

ตารางที่ 9.2 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบวงกลม

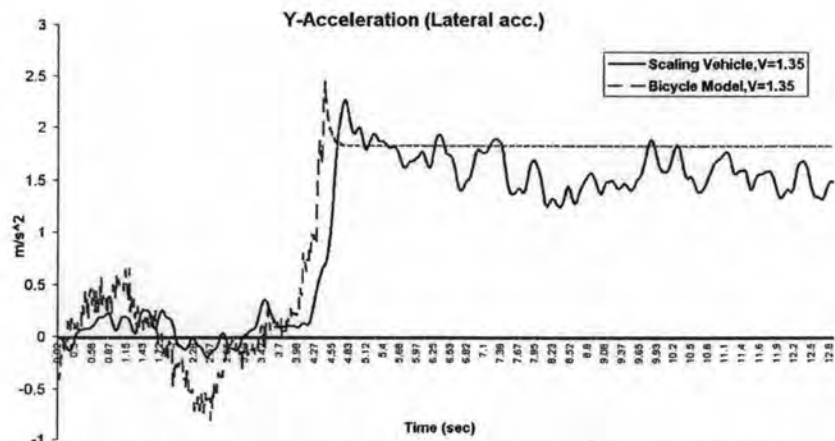
ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (deg/s)	คำนวณ (deg/s)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	40.4	51	26.2
1.35	79.4	67.6	14.8
2.0	120.5	103.6	14.0

จากรายการที่ 9.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบย่อยส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ ในส่วนของข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 14.0-26.2 % โดยค่าความผิดพลาดพิจารณาจากข้อมูลในช่วงที่มีความแตกต่างกันสูงสุดระหว่างข้อมูลที่วัดได้และข้อมูลจากการคำนวณ

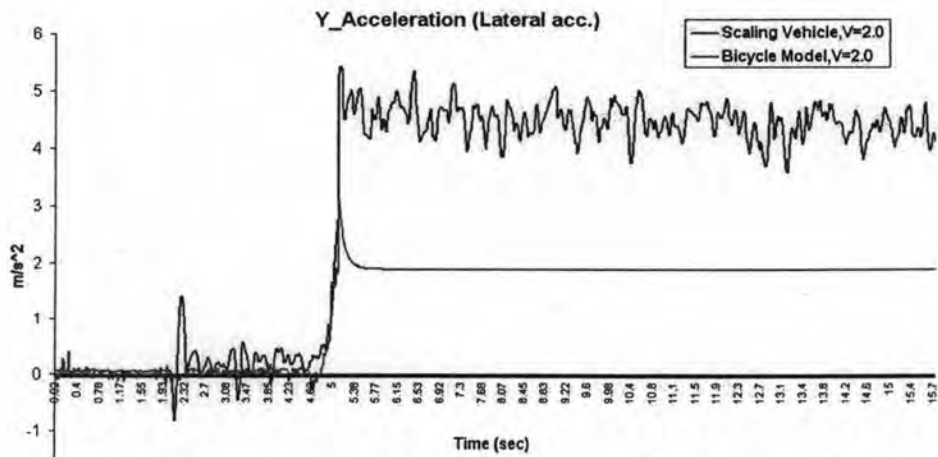
ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.11 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$

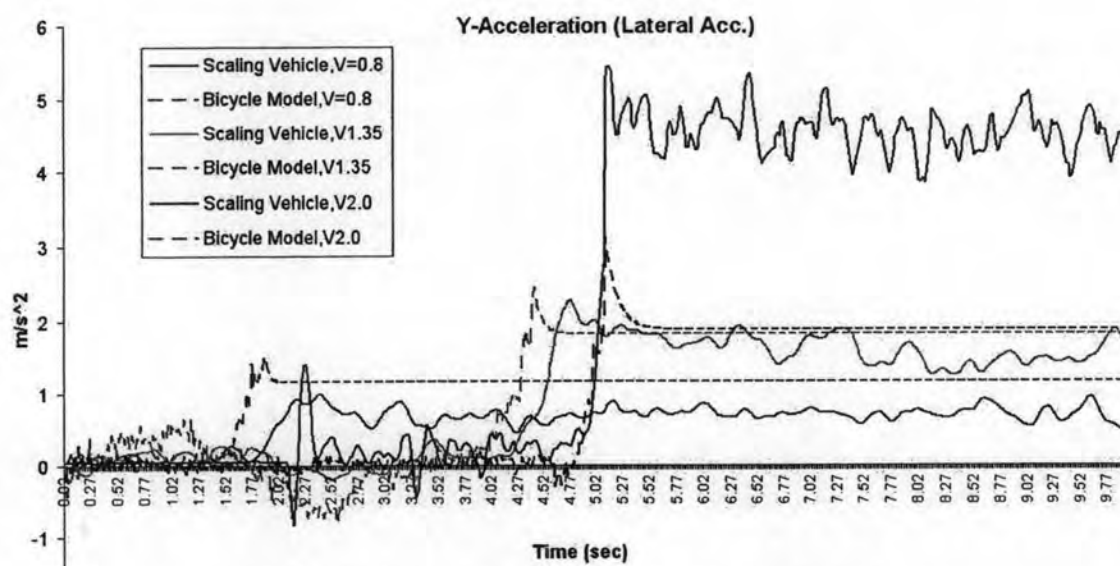


รูปที่ 9.12 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.13 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$

เมื่อนำข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะ
ได้ผลดังนี้



รูปที่ 9.14 ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

ตารางที่ 9.3 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบวงกลม

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (m/s^2)	คำนวณ (m/s^2)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	0.75	1.15	53.3
1.35	1.82	1.55	14.8
2.0	4.4	1.88	57.3

จากตารางที่ 9.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ
ย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ ในส่วนของ
ข้อมูลความเร่งด้านข้างจะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 14.8-57.3 % โดยค่าความผิดพลาด
พิจารณาจากข้อมูลในช่วงที่มีความแตกต่างกันสูงสุดระหว่างข้อมูลที่วัดได้และข้อมูลจากการ
คำนวณ

สำหรับในการทดลองตัวแปรที่สำคัญของสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของ
ยานพาหนะแบบ 2 ล้อ คือ ค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\alpha_f = \delta_f - \tan^{-1}\left(\frac{v + ar}{u}\right) \quad (9.1)$$

โดยกำหนดให้

α_f คือ ค่ามุมลื่นไถลของล้อหน้า

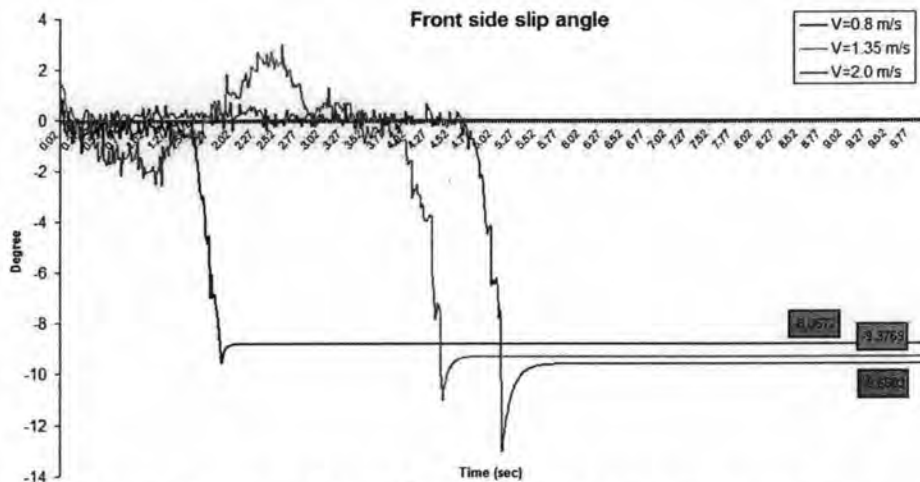
δ_f คือ มุมเลี้ยวของล้อหน้า

v คือ ความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

a คือ ระยะห่างจากเพลาของล้อหน้าถึงจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ

r คือ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน z

u คือ ความเร็วของยานพาหนะ



รูปที่ 9.15 ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s

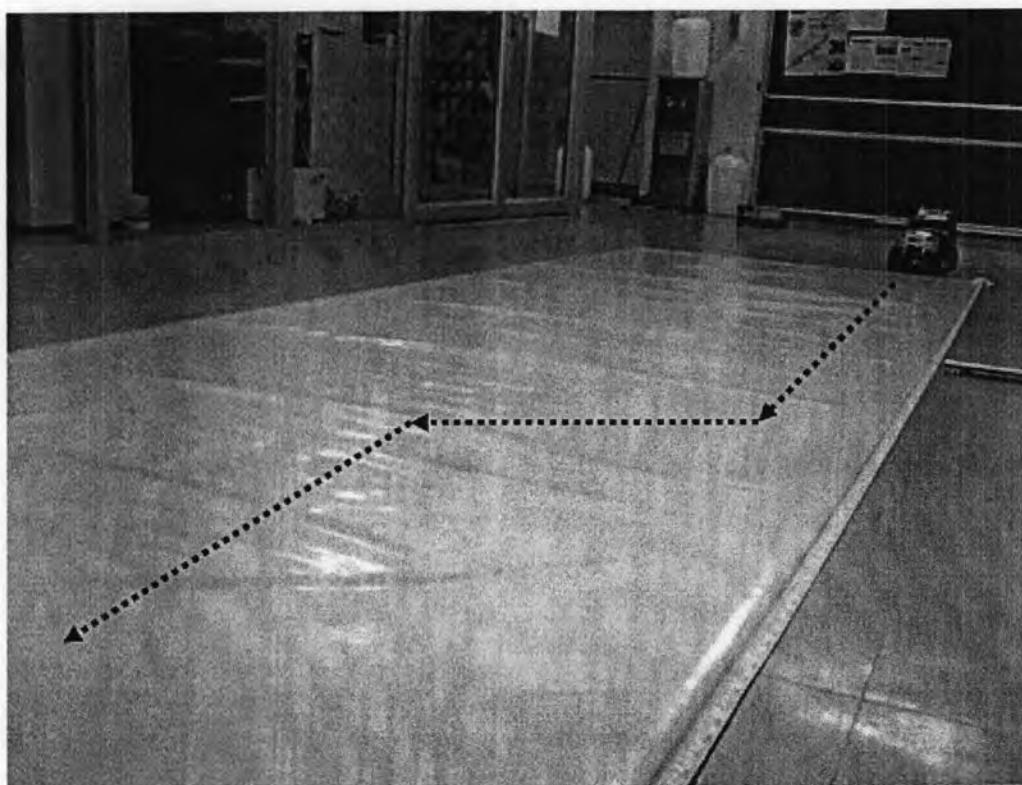
ตารางที่ 9.4 ผลการทดลองในกรณีเคลื่อนที่แบบวงกลม

การทดลอง	ความเร็ว (m/s)	มุมเลี้ยว(องศา)	มุมลื่นไถล(องศา)
1	0.80	16°	8.8677°
2	1.35	16°	9.3769°
3	2.00	16°	9.6603°

ผลจากการทดสอบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนที่ความเร็ว 3 ระดับในการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยที่ค่าของมุมเลี้ยวล้อหน้าได้มาจากเซนเซอร์ และค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าคำนวณจากสมการ (9.1) สรุปเป็นดังตารางที่ 9.4 จากข้อมูลเมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและจากการคำนวณระดับพบว่าที่ความเร็วต่ำจะมีค่าความผิดพลาดมากกว่าความเร็วที่ระดับกลางและสูง ในส่วนของความเร่งด้านข้างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนพบว่าที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูง นั้นมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในส่วนของความเร็วระดับกลาง

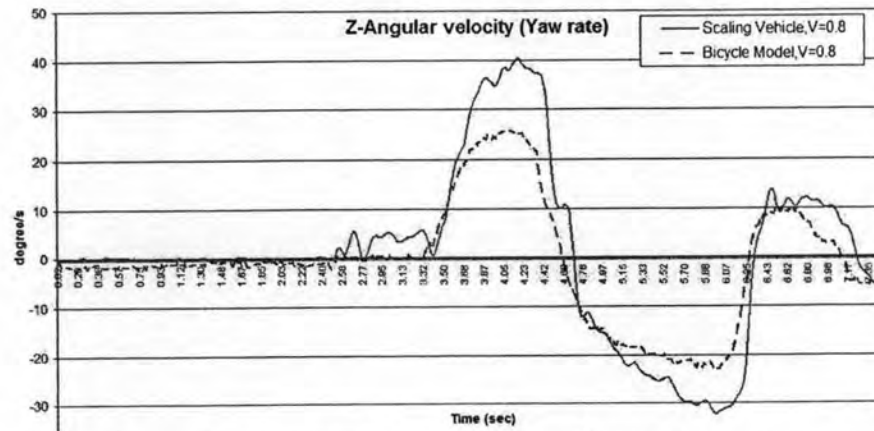
9.2.2 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์

ในการควบคุมยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วนให้เคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์ จะเริ่มจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคง โดยเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไประยะหนึ่งแล้วหักมุมมุมเดียวแล้วหักมุมมุมเดียวกลับในตำแหน่งทิศทางตรงเช่นเดิมในตอนแรก ความเร็วที่ใช้จะเป็น 3 ระดับ จากความเร็วระดับช้า ($V=0.8\text{m/s}$) ระดับกลาง ($V=1.35\text{m/s}$) และระดับสูง ($V=2.0\text{m/s}$) โดยจากการทดสอบเมื่อนำข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วนเปรียบเทียบกับผลข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลอง ผลที่ได้มีดังนี้ (โดยข้อมูลจากรูปภาพ เส้นประหมายถึงข้อมูลจากการคำนวณ และเส้นทึบหมายถึงข้อมูลจากยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วน)

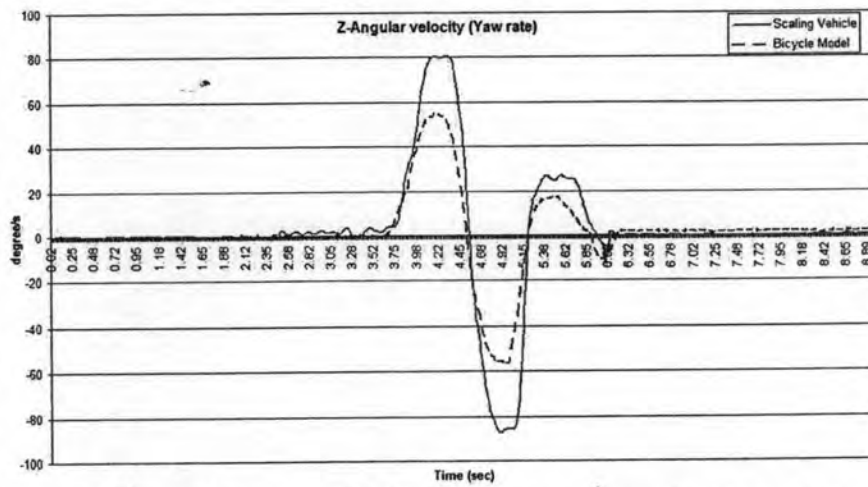


รูปที่ 9.16 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์

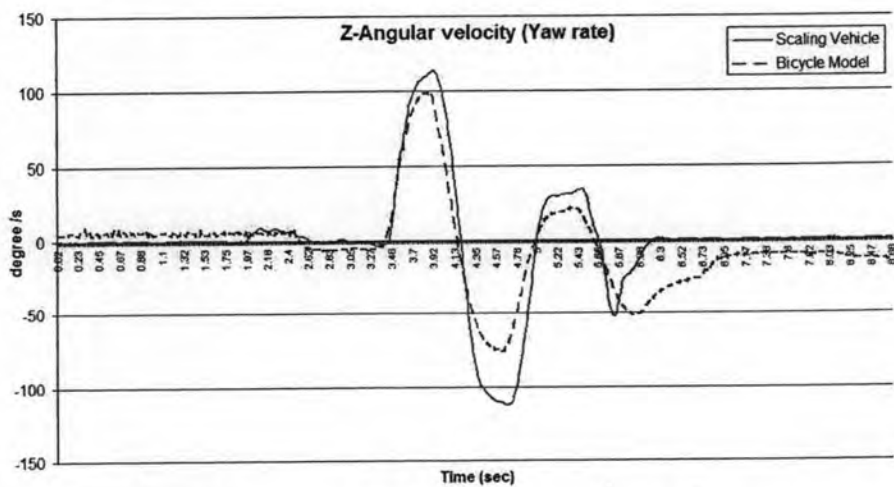
ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.17 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว V=0.8m/s

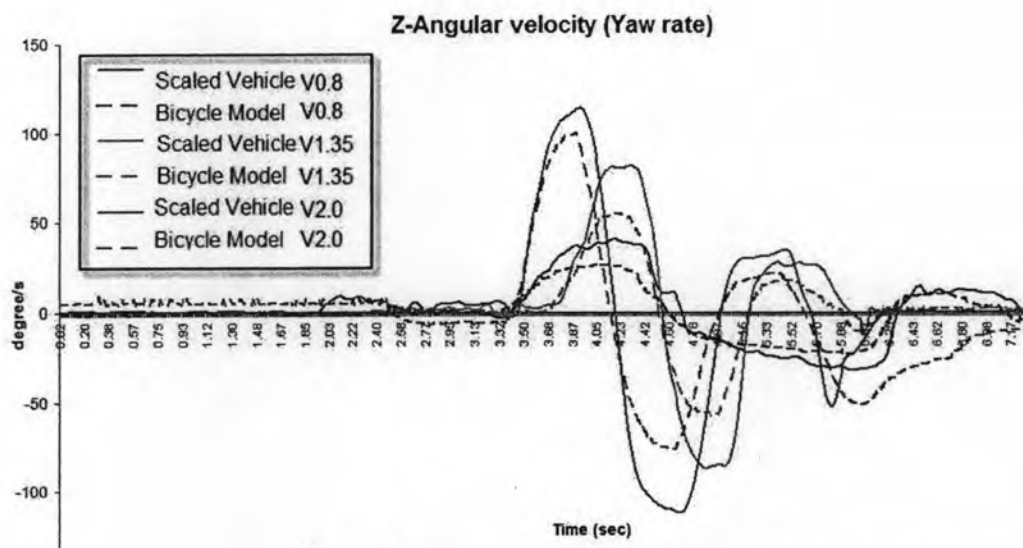


รูปที่ 9.18 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว V=1.35m/s



รูปที่ 9.19 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว V=2.0m/s

เมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะได้ผลดังนี้



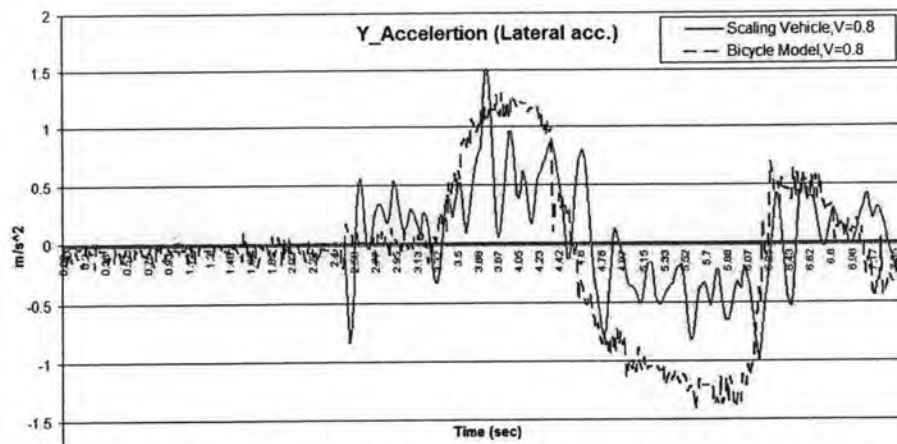
รูปที่ 9.20 ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z

ตารางที่ 9.5 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบเปลี่ยนเลนส์

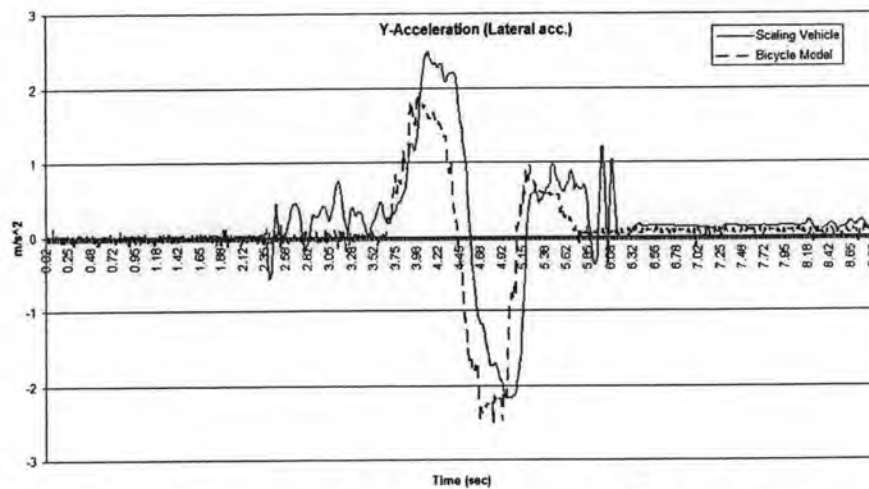
ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (deg/s)	ค่านวน (deg/s)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	-31 to 35	-22 to 25	29
1.35	-85 to 80	±54	36.5
2.0	±113	-75 to 99	33.6

จาดตารางที่ 9.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ ในส่วนของข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 29-36.5 % แต่เมื่อพิจารณาลักษณะแนวโน้มของข้อมูลทั้งสอง (ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ) นั้นพบว่ามีความคล้ายคลึงกัน โดยค่าความผิดพลาดพิจารณาจากข้อมูลในช่วงที่มีความแตกต่างกันสูงสุดระหว่างข้อมูลที่วัดได้และข้อมูลจากการคำนวณ

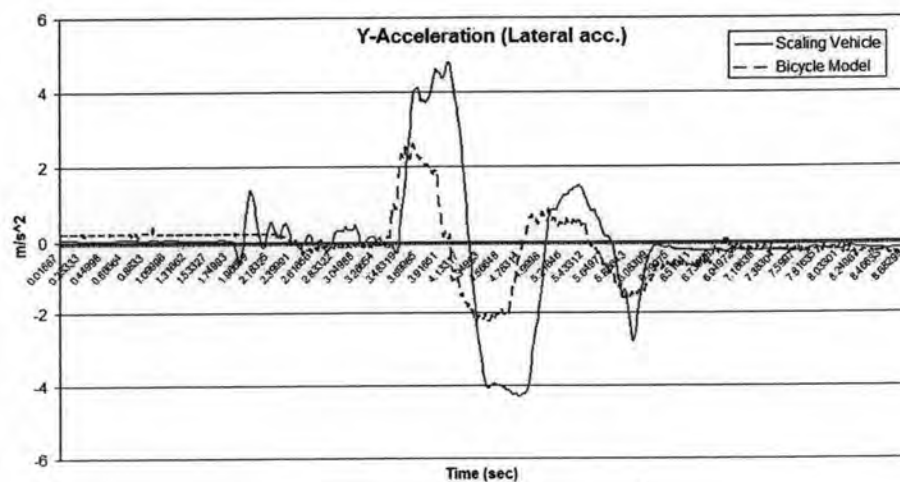
ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.21 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=0.8m/s

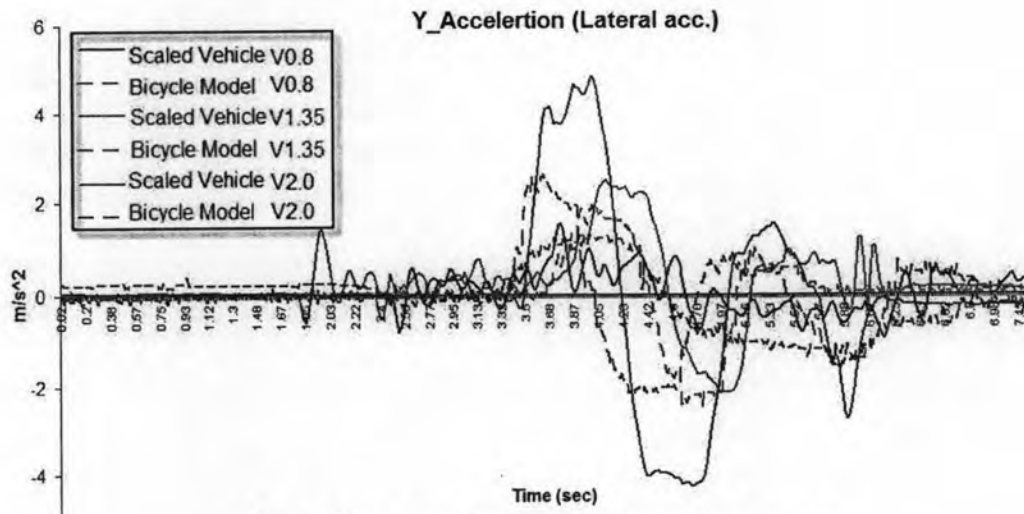


รูปที่ 9.22 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=1.35m/s



รูปที่ 9.23 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=2.0m/s

เมื่อนำข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะ
ได้ผลดังนี้



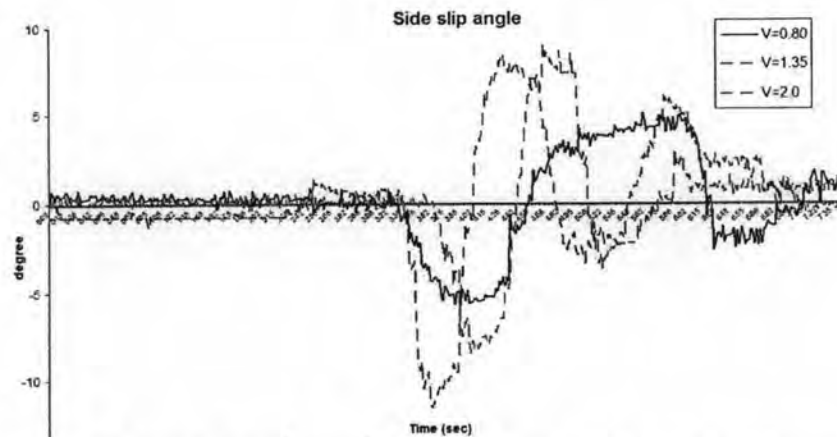
รูปที่ 9.24 ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

ตารางที่ 9.6 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบเปลี่ยนเลนส์

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (m/s ²)	ค่านวน (m/s ²)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	±1	±1.35	35
1.35	±2.1	±2	10
2.0	±4	±2	50

จาดตารางที่ 9.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ
ย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วน
ข้อมูลความเร่งด้านข้างจะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 10-50 % ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่สูง แต่เมื่อ
พิจารณาลักษณะแนวโน้มของข้อมูลทั้งสอง (ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์กับข้อมูลที่ได้จากการ
คำนวณ) นั้นพบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกัน โดยค่าความผิดพลาดพิจารณาจากข้อมูลในช่วงที่มี
ความแตกต่างกันสูงสุดระหว่างข้อมูลที่วัดได้และข้อมูลจากการคำนวณ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 9.25 ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s

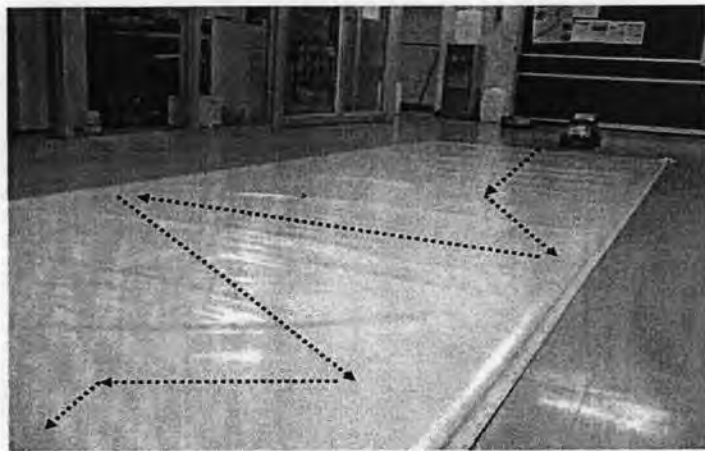
ตารางที่ 9.7 ผลการทดลองในกรณีแบบเปลี่ยนเลนส์

การทดลอง	ความเร็ว (m/s)	มุมเลี้ยว(องศา)	มุมลื่นไถล(องศา)
1	0.80	10°	6°
2	1.35	13°	8°
3	2.00	14°	10°

ผลจากการทดสอบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนที่ความเร็ว 3 ระดับในการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยที่ค่าของมุมเลี้ยวล้อหน้าได้มาจากเซนเซอร์ และค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าคำนวณจากสมการ (9.1) สรุปเป็นดังตารางที่ 9.7 จากข้อมูลเมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z ที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและจากการคำนวณระดับพบว่าที่ทุกความเร็วมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูงในส่วนของความเร่งด้านข้างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนพบว่าที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูง นั้นมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในส่วนของความเร็วระดับกลาง

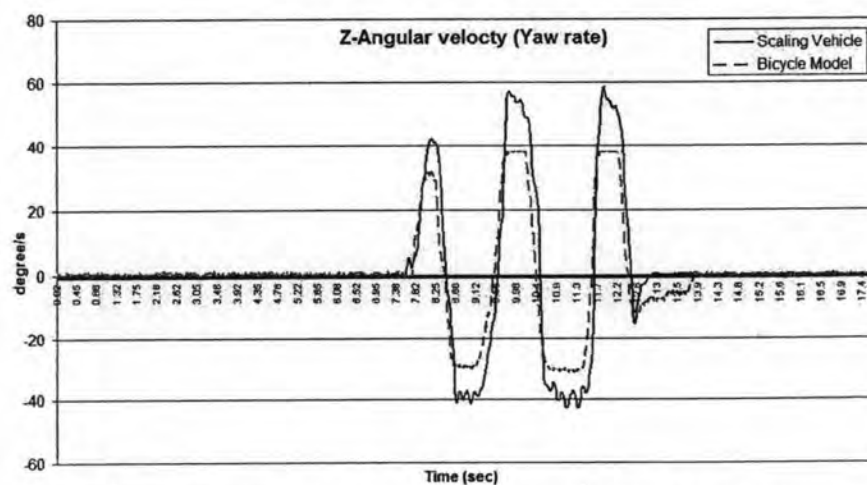
9.2.3 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบซิกแซ็ก

ในการควบคุมยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนให้เคลื่อนที่แบบซิกแซ็ก จะเริ่มจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคง โดยเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไประยะหนึ่งแล้วหักหมุนมุมเลี้ยวซ้าย-ขวา ซ้ายตามลำดับ แล้วหักหมุนมุมเลี้ยวในตำแหน่งตรงเช่นเดิมในตอนแรก ความเร็วที่ใช้จะเป็นระดับจากความเร็วระดับช้า ($V=0.8\text{m/s}$) ระดับกลาง ($V=1.35\text{m/s}$) และระดับสูง ($V=2.0\text{m/s}$) โดยจากการทดสอบเมื่อนำข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเปรียบเทียบกับผลข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลอง ผลที่ได้มีดังนี้ (โดยข้อมูลจากรูปภาพ เส้นประหมายถึงข้อมูลจากการคำนวณ และเส้นทึบหมายถึงจากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน)

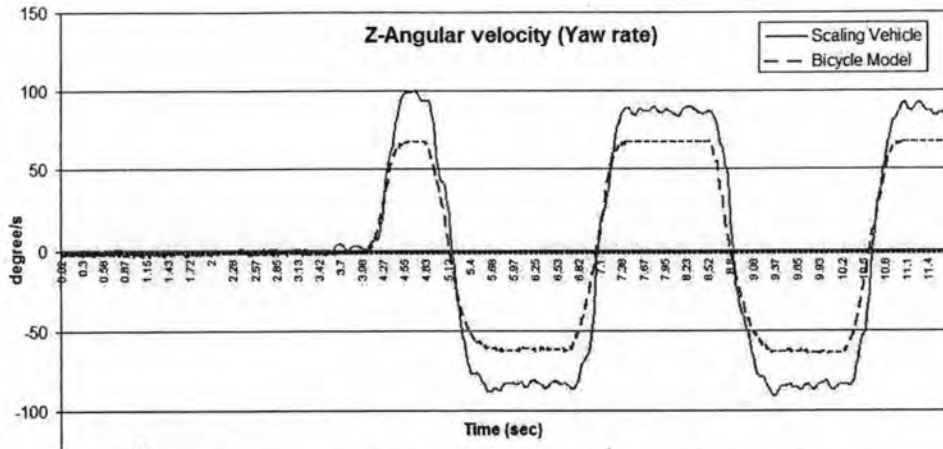


รูปที่ 9.26 การทดสอบเคลื่อนที่แบบซิกแซ็ก

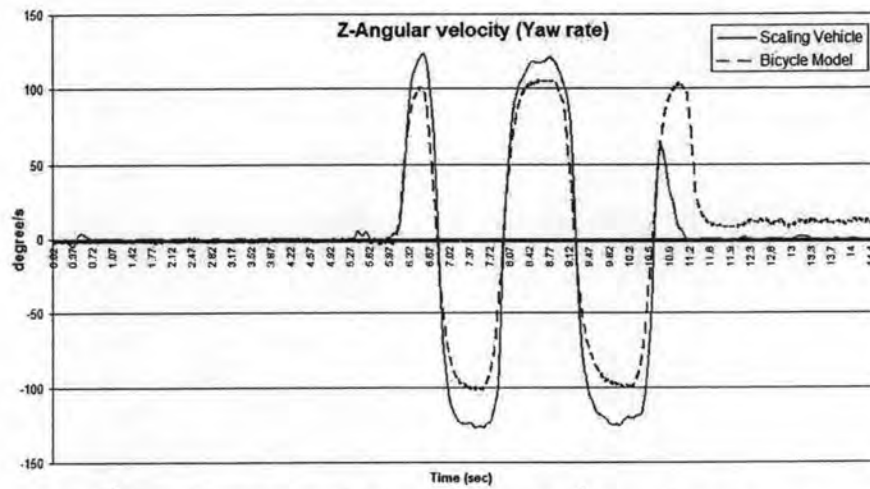
ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.27 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$

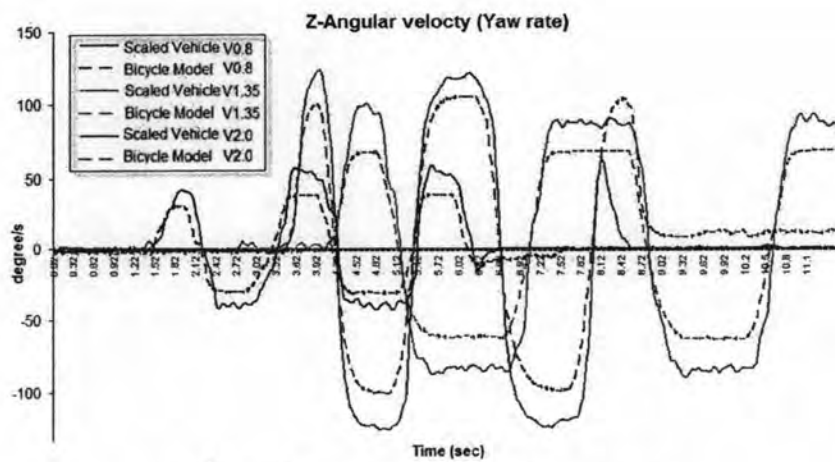


รูปที่ 9.28 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.29 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$

เมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะได้ผลดังนี้

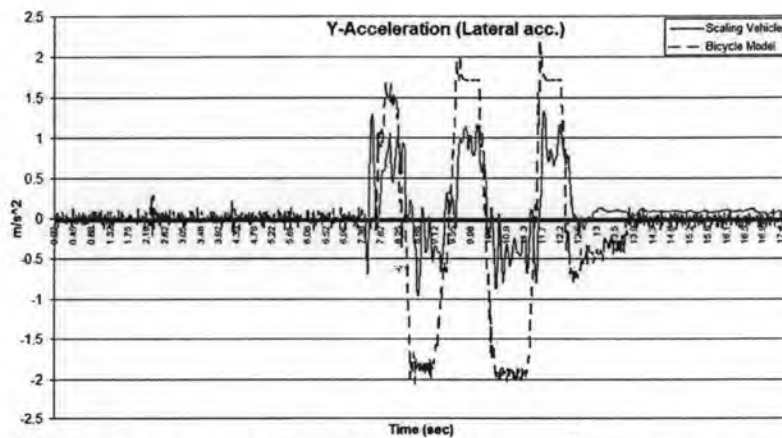


รูปที่ 9.30 ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z

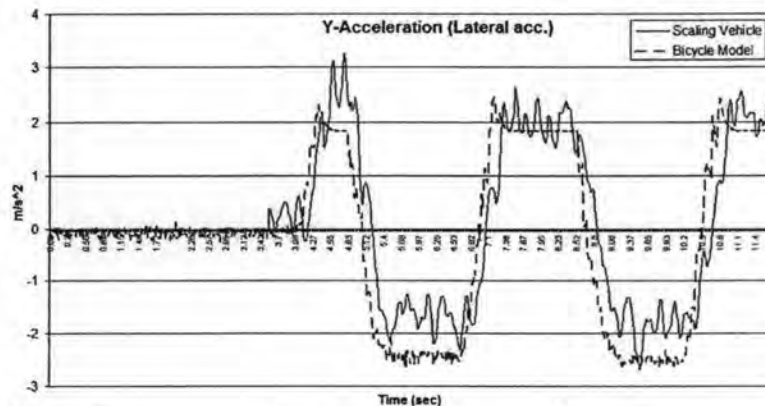
ตารางที่ 9.8 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะในการทดสอบซิกแซ็ก

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (deg/s)	คำนวณ (deg/s)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	-38 to 54	-30 to 38	30
1.35	-83 to 86	-60 to 68	27
2.0	-123 to 120	-101 to 105	17

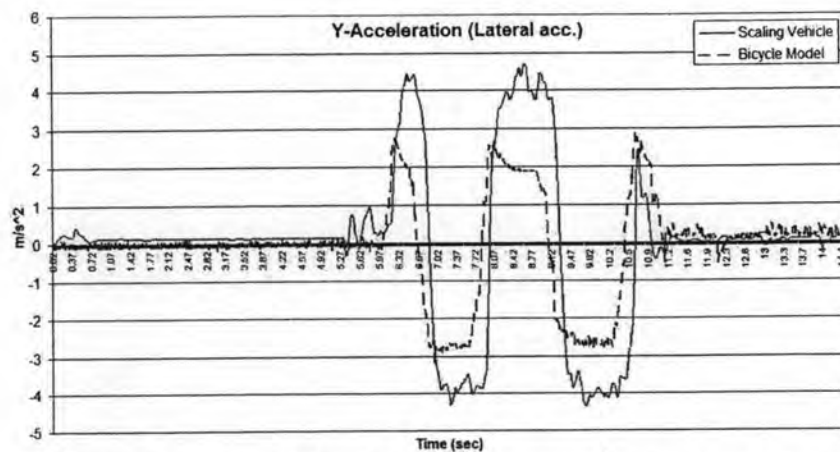
จาดตารางที่ 9.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วนของคุณสมบัติความเร็วเชิงมุมรอบแกน z จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 17-30 % แต่เมื่อพิจารณาลักษณะแนวโน้มของข้อมูลทั้งสอง (ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ) นั้นพบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกัน และจากข้อมูลความเร็วด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0 m/s จะได้ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 9.31 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.8\text{m/s}$

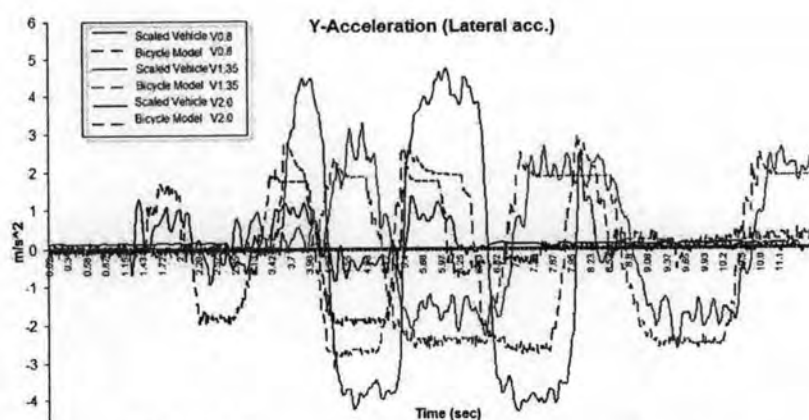


รูปที่ 9.32 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.33 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=2.0\text{m/s}$

เมื่อนำข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะ
ได้ผลดังนี้



รูปที่ 9.34 ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

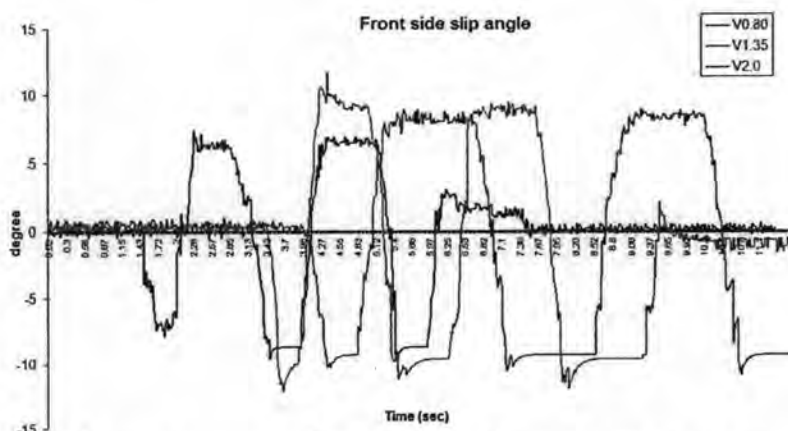
ตารางที่ 9.9 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างของยานพาหนะในการทดสอบซิกแน็ก

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (m/s^2)	คำนวณ (m/s^2)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	-0.7 to 1.26	-1.8 to 1.7	15
1.35	-2.0 to 2.0	-2.4 to 1.8	20
2.0	-3.8 to 4.0	-2.6 to 1.9	50

จาดตารางที่ 9.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ
ย่อยส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วนของ
ข้อมูลความเร่งด้านข้างจะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 15-50 % ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่สูง แต่เมื่อ

พิจารณาลักษณะแนวโน้มของข้อมูลทั้งสอง (ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์กับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ) นั้นพบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกัน

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 9.35 ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.8, 1.35 และ 2.0m/s

ตารางที่ 9.10 ผลการทดลองในกรณีแบบซิกแซก

การทดลอง	ความเร็ว (m/s)	มุมเลี้ยว(องศา)	มุมลื่นไถล(องศา)
1	0.80	14°	7.6°
2	1.35	16°	9.1°
3	2.00	16°	9.6°

ผลจากการทดสอบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนที่ความเร็ว 3 ระดับในการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยที่ค่าของมุมเลี้ยวล้อหน้าได้มาจากเซนเซอร์ และค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าคำนวณจากสมการ (9.1) สรุปเป็นดังตารางที่ 9.10 จากข้อมูลเมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z และความเร่งด้านข้างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนพบว่าที่ทุกความเร็วมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูง แต่ลักษณะแนวโน้มของข้อมูลทั้งสองนั้นพบว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกัน

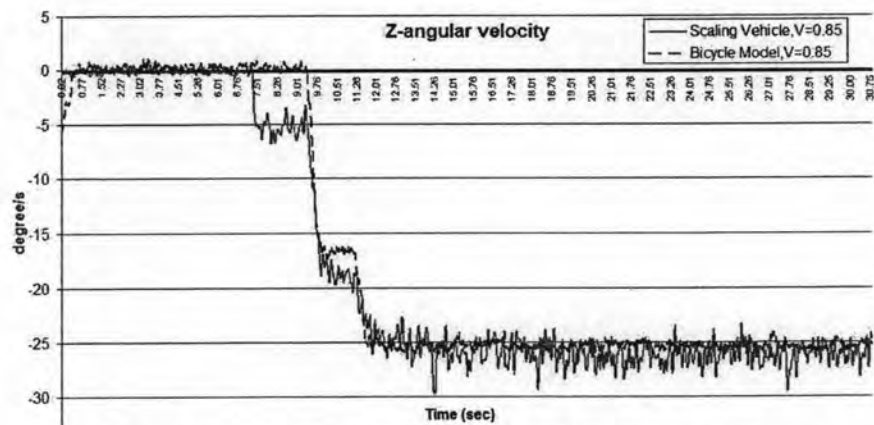
จากข้อมูลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนกับการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ มีค่าความถูกต้องแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากสมการตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ค่ามุมลื่นไถลของล้อหน้าในขณะการหักเลี้ยว โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6-10 องศา จากการทดลอง ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าหากทำการทดลองให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดยทำการทดลองให้มุมลื่นไถลที่ล้อหน้ามีค่าน้อยลง ดังนั้นผล

ที่ได้จะต้องมีค่าความผิดพลาดน้อยลงไปด้วย ฉะนั้นทำการทดลองอีกครั้ง โดยเงื่อนไขในการทดสอบจะควบคุมค่ามุมลื่นไถลของล้อหน้าไม่เกิน 5 องศา

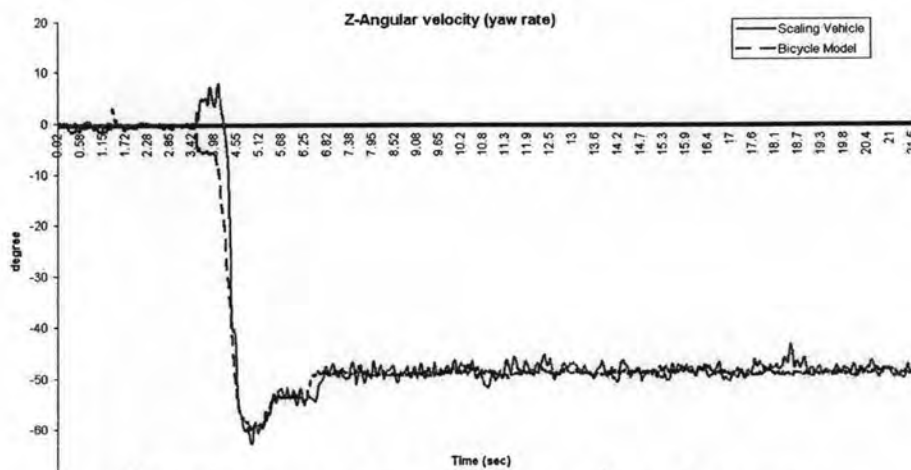
9.2.4 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบวงกลมเมื่อกำหนดค่ามุมลื่นไถลไม่เกิน 5 องศา

การควบคุมให้ค่ามุมลื่นไถลไม่เกิน 5 องศา โดยการควบคุมการหักเลี้ยวของมุมล้อหน้าของยานพาหนะจริงแบบย่อบส่วนจากผู้ควบคุมให้เลี้ยวน้อยลง แล้วนำผลข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ได้ดังนี้

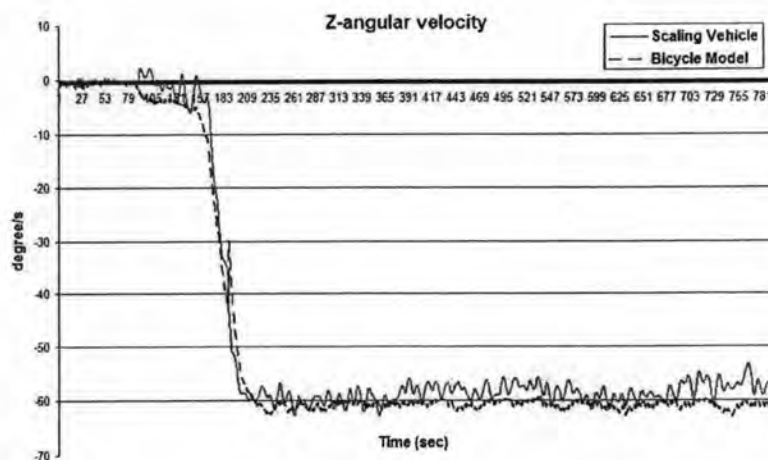
ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.36 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$

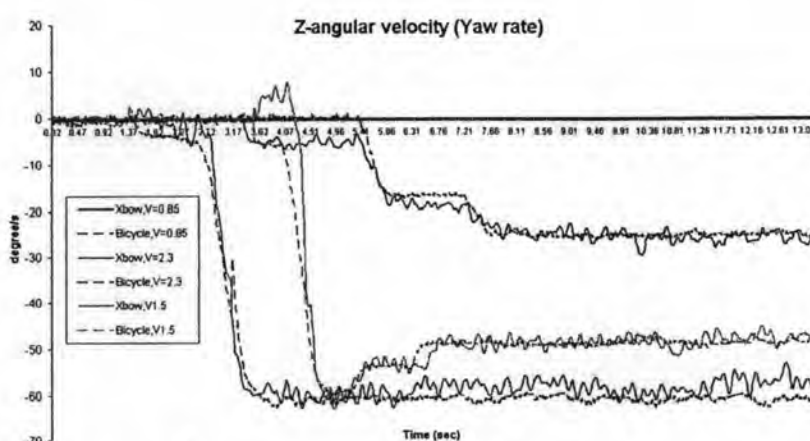


รูปที่ 9.37 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.5\text{m/s}$



รูปที่ 9.38 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=2.3\text{m/s}$

เมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะได้ผลดังนี้



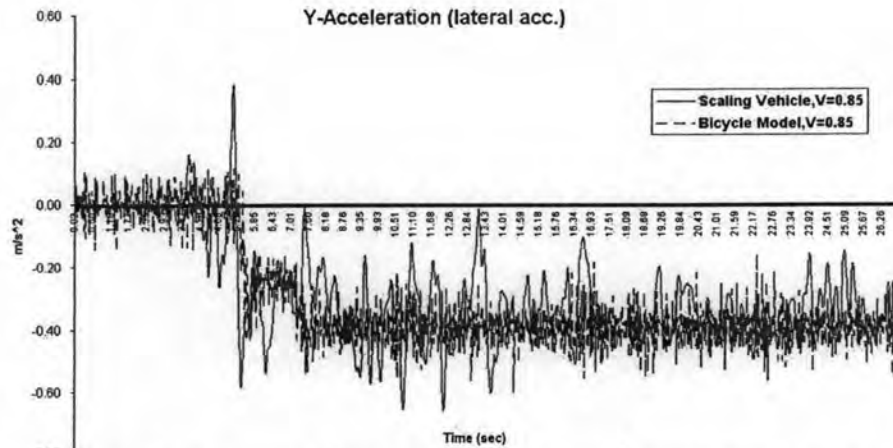
รูปที่ 9.39 ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน z

ตารางที่ 9.11 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ในการทดสอบวงกลมกรณีมุมลื่นไถลน้อย

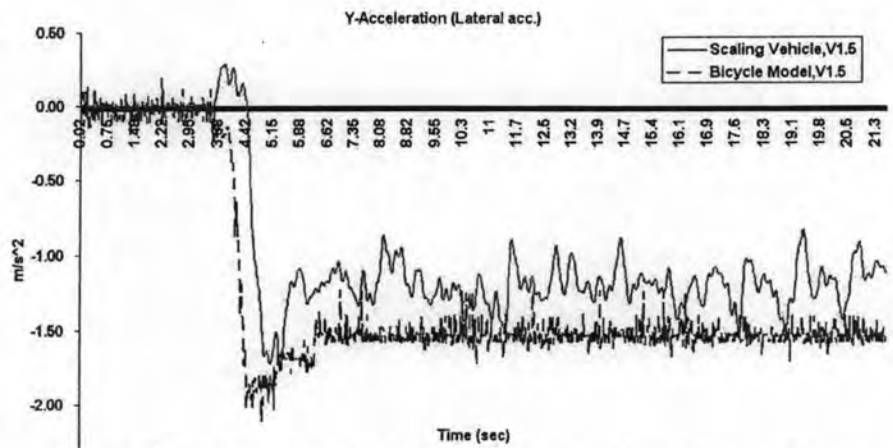
ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (deg/s)	คำนวณ (deg/s)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.85	-26.15	-25.35	3.1
1.5	-48.4	.48.8	0.1
2.0	-57.57	-60.96	5.9

จาดตารางที่ 9.11 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบย่อยส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วนของข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.1-5.9 %

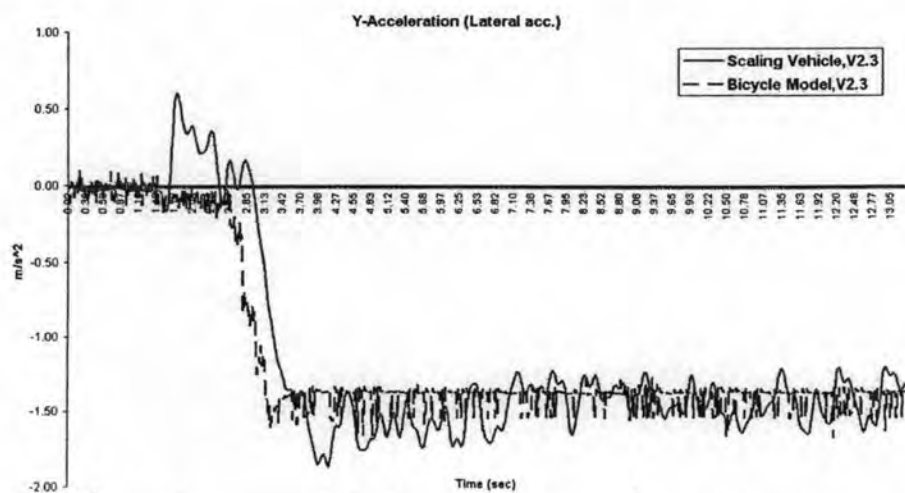
ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.40 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=0.85m/s

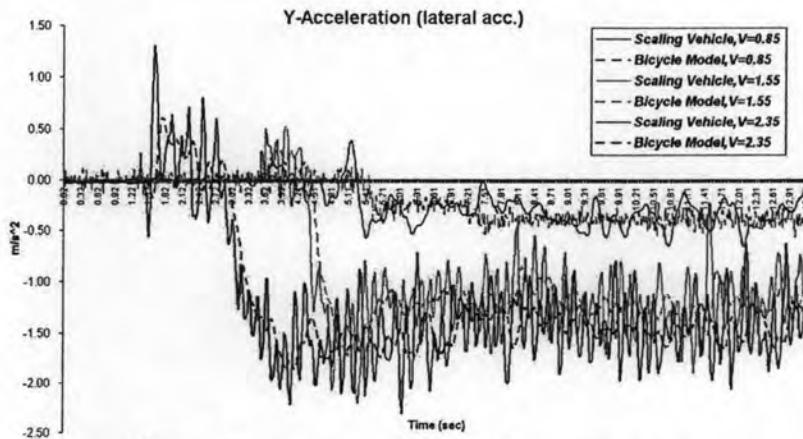


รูปที่ 9.41 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=1.50m/s



รูปที่ 9.42 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=2.3m/s

เมื่อนำข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะ
ได้ผลดังนี้



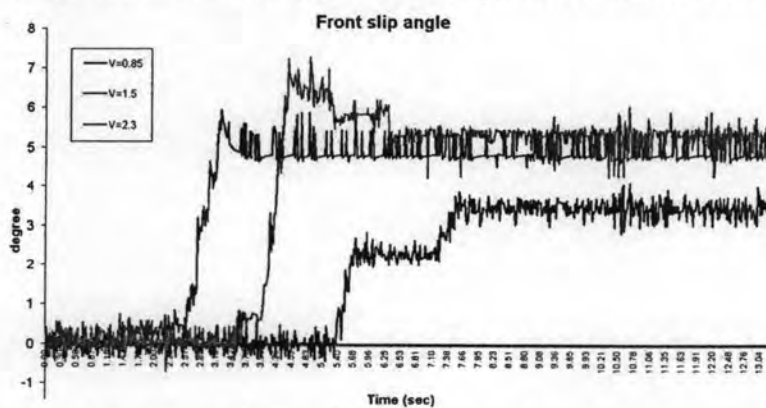
รูปที่ 9.43 ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

ตารางที่ 9.12 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างในการทดสอบวงกลมกรณีมุมลื่นไถลน้อย

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (m/s ²)	คำนวณ (m/s ²)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.8	-0.39	-0.35	11.4
1.35	1.29	1.51	17
2.0	-1.4	-1.46	4.3

จากรายการที่ 9.12 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ
ย่อยส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วน
ข้อมูลความเร่งด้านข้างจะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 4.3-17 %

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าจะได้ผลดังนี้

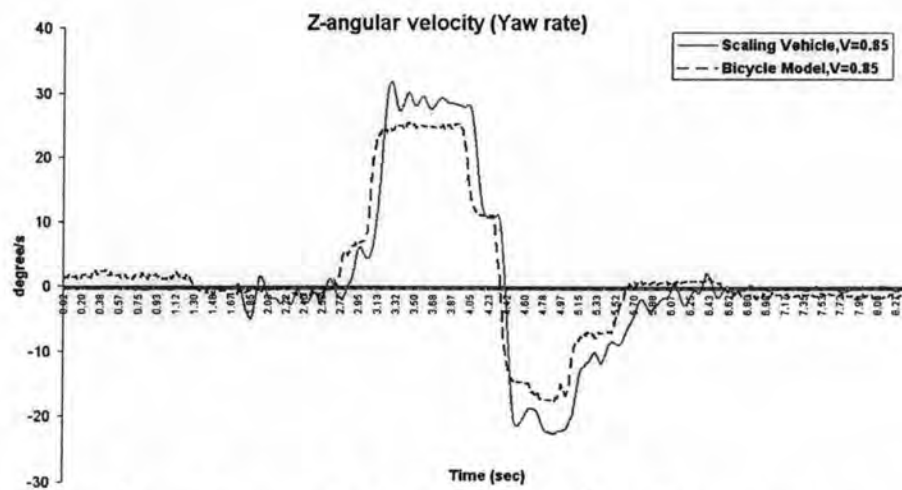


รูปที่ 9.44 ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3m/s

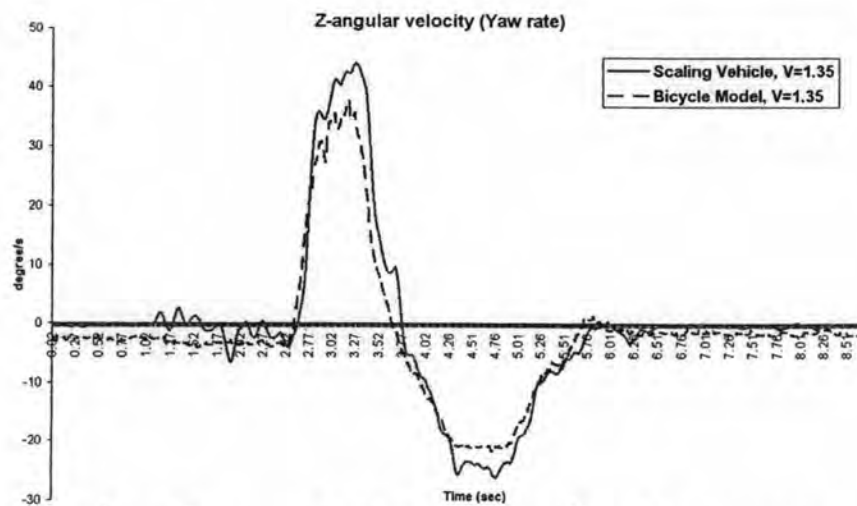
ตารางที่ 9.13 ผลการทดลองในกรณีแบบเคลื่อนที่วงกลมกรณีมุมลื่นไถลน้อย

การทดลอง	ความเร็ว (m/s)	มุมเลี้ยว(องศา)	มุมลื่นไถล(องศา)
1	0.85	6.2°	3.48°
2	1.50	9°	5.1°
3	2.3	8.5°	4.9°

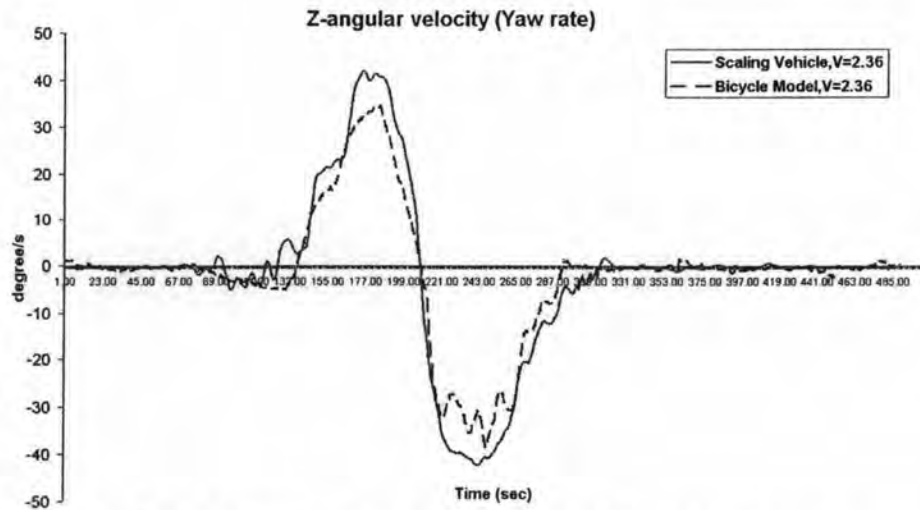
9.2.4 ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์เมื่อกำหนดค่ามุมลื่นไถลไม่เกิน 5 องศา
ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว 0.85, 1.35 และ 2.3 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 9.45 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$

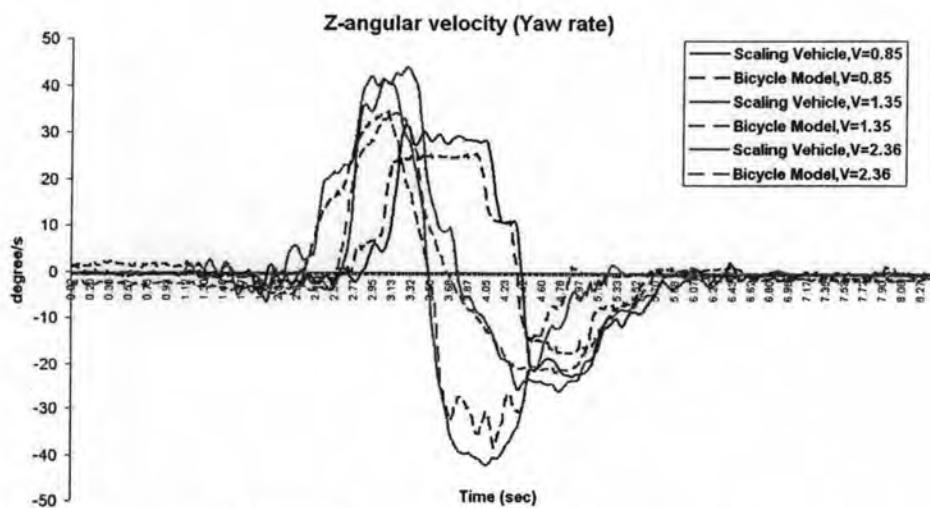


รูปที่ 9.46 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.47 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ความเร็ว V=2.3m/s

เมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะได้ผลดังนี้



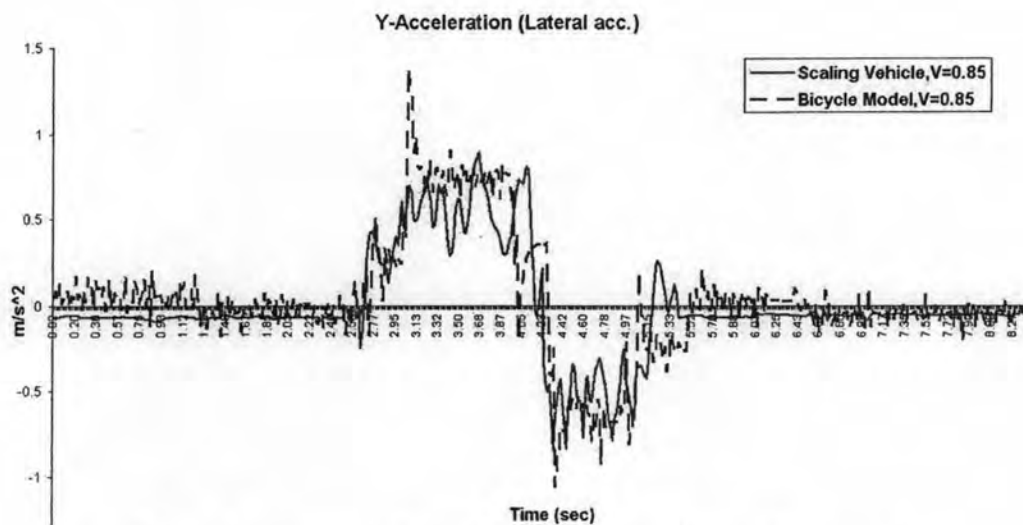
รูปที่ 9.48 ข้อมูลรวมความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z

ตารางที่ 9.14 เปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ทดสอบเปลี่ยนเลนส์กรณีมุมลื่นไถลน้อย

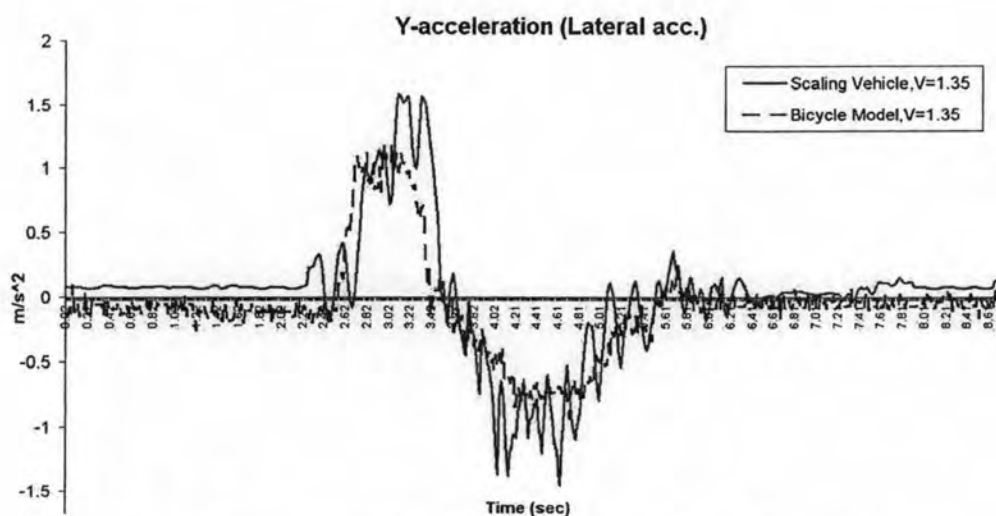
ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (deg/s)	คำนวณ (deg/s)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.85	-20 to 28	-17.5 to 24.6	12
1.35	-24.4 to 42	-20.8 to 34	19
2.3	-40 to 40.6	-32 to 34.4	20

จาดารางที่ 9.14 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ ย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วนของ ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 14.0-26.2 %

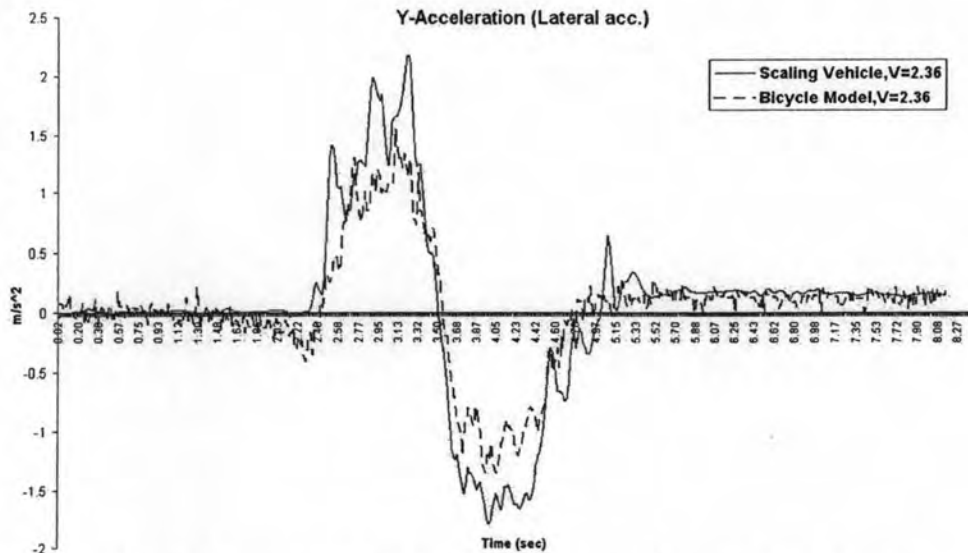
จากการทดลองจะได้ผลของข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว 0.85, 1.35 และ 2.3 m/s ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 9.49 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=0.85\text{m/s}$

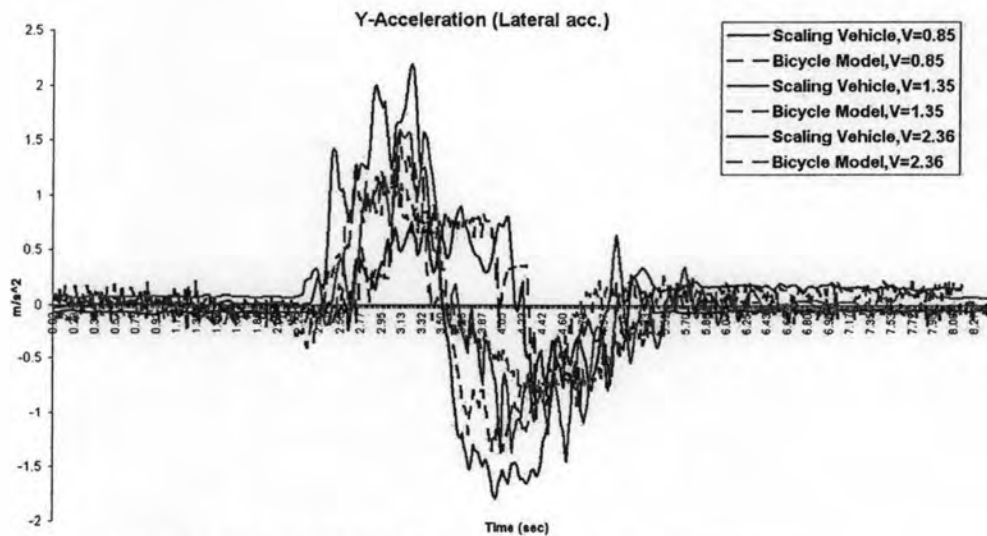


รูปที่ 9.50 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว $V=1.35\text{m/s}$



รูปที่ 9.51 ข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะที่ความเร็ว V=2.3m/s

เมื่อนำข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะแต่ละความเร็วเมื่อเปรียบเทียบรวมกันจะ
ได้ผลดังนี้



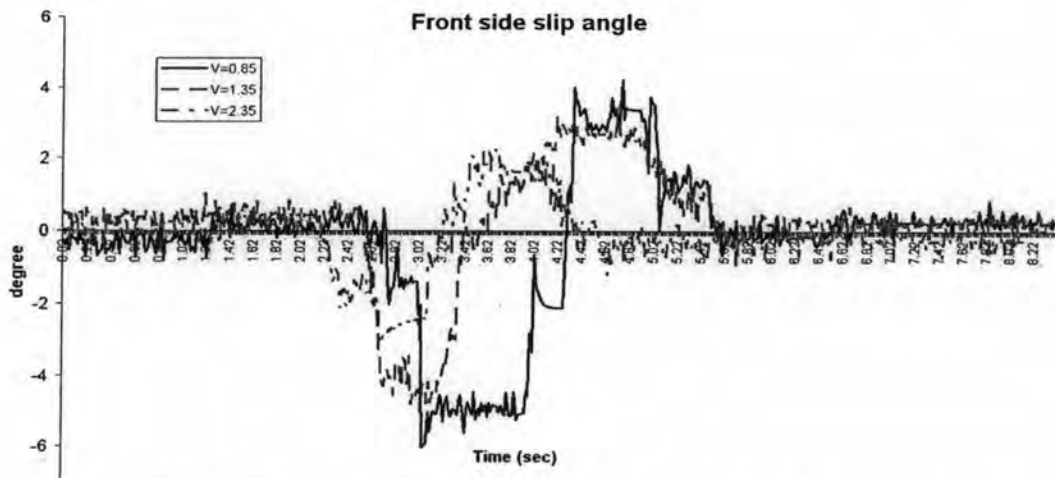
รูปที่ 9.52 ข้อมูลรวมความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ

ตารางที่ 9.15 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างในการทดสอบเปลี่ยนเลนส์กรณีมุมลื่นไถลน้อย

ระดับความเร็ว	เซนเซอร์ (m/s ²)	คำนวณ (m/s ²)	ค่าความผิดพลาด (%)
0.85	-0.52 to 0.57	-0.66 to 0.63	27
1.35	-0.85 to 1.18	-0.73 to 1.03	14
2.36	-1.4 to 1.6	-1.1 to 1.34	21

จาดตารางที่ 9.15 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าถูกต้องของข้อมูลบนยานพาหนะจริงแบบ ย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อในส่วนของ ข้อมูลความเร่งด้านข้างจะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 14-27 %

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 9.53 ข้อมูลค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าที่ความเร็ว 0.85, 1.5 และ 2.3m/s

ตารางที่ 9.16 ผลการทดลองแบบเปลี่ยนเลนส์กรณีมุมลื่นไถลน้อย

การทดลอง	ความเร็ว (m/s)	มุมเลี้ยว(องศา)	มุมลื่นไถล(องศา)
1	0.80	7.5°	2.5°
2	1.35	6.5°	4°
3	2.00	4°	4.5°

จากการทดลองในกรณีเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนส์ ด้วยมุมลื่นไถลของล้อไม่เกิน 5 องศา ในการเคลื่อนที่แต่ละความเร็วเป็นดังตารางที่ 9.16 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z และข้อมูล ความเร่งด้านข้างของยานพาหนะเมื่อเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดลดลงจากการ ทดสอบในกรณีค่ามุมลื่นไถลมีค่ามากกว่า 5 องศา โดยมีค่าความแม่นยำใกล้เคียงกันมากในช่วงที่ ความเร็วต่ำและระดับกลาง

9.3 สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ จะเห็นว่าตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่ง ในการที่จะให้ค่าที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนและแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ มีความผิดพลาดต่ำ คือ ค่ามุมลื่นไถลที่ล้อหน้าของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเนื่องจากแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองที่พิจารณาอยู่ช่วงเชิงเส้นและที่มุมลื่นไถลของล้อหน้าไม่เกิน 10 องศา จากการทดลองควบคุมการเคลื่อนของยานพาหนะด้วยความเร็วคงที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ($V=0.8\text{m/s}$) ระดับกลาง ($V=1.35\text{m/s}$) และระดับสูง ($V=2.0\text{m/s}$) โดยใช้เส้นทางแบบวงกลม เปลี่ยนเลนส์ และซิกแซก ในตอนแรกควบคุมไม่ให้มุมลื่นไถลเกิน 10 องศาพบ ผลการทดลองพบว่าเกิดค่าความผิดพลาดในส่วน of ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน z สูงสุดถึง 36% และข้อมูลความเร่งด้านข้างของยานพาหนะสูงสุดถึง 57% แต่แนวโน้มของข้อมูลมีทิศทางในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นเพื่อลดค่าความผิดพลาดให้เป็นไปตามหลักการของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ จึงทำการทดสอบที่มุมลื่นไถลที่น้อยลง โดยควบคุมไม่ให้เกิน 5 องศา จากผลการทดลองพบว่าค่าความผิดพลาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่ายานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสามารถนำไปทดสอบทางพลศาสตร์ที่มีความสมมูลกับยานพาหนะจริงได้ ภายใต้เงื่อนไขของมุมลื่นไถลที่ล้อหน้าไม่เกิน 5 องศาเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะแบบ 2 ล้อ