

การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

นายกฤษดา จันทร์แดง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLLABORATION OF VEHICLE DYNAMIC SIMULATION WITH SCALING VEHICLE

Mr. Krissada Chundang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

นายกฤษฎดา จันทร์แดง : การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน.

(Collaboration of vehicle dynamic simulation with scaling vehicle)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์การจำลองพลศาสตร์ของพาหนะจริงกับพาหนะจริงย่อส่วน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการพัฒนายานยนต์ย่อส่วนให้มีพฤติกรรมทางพลศาสตร์สมมูลกับพาหนะจริง ยานยนต์ย่อส่วนนี้ถูกควบคุมด้วยมนุษย์ผ่านจากเครื่องจำลองเสมือนจริงสามมิติ งานวิจัยที่สำคัญคือการออกแบบตัวกรองเสมือนจริงโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาการควบคุม ตรรกะและอัลกอริทึมของเครื่องจำลองเสมือนจริงสามมิติให้เสมือนจริงมากที่สุด เครื่องจำลองเสมือนจริงในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างการเคลื่อนที่สามแนวแกนคือ หมุนในแกนพิทช์ หมุนในแกนโรล และขึ้นลงในแนวตั้ง ตัวแปรพลศาสตร์ที่สำคัญของยานพาหนะ เช่น ความเร่งเชิงเส้น ความเร็วเชิงมุม มุมเลี้ยว และ ความเร็วล้อ เป็นต้น ถูกวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดและถูกส่งไปยังระบบควบคุมหลัก ตามกระบวนการในตัวกรองเสมือนจริง ซึ่งถูกออกแบบมาบนพื้นฐานของระบบการรับรู้และการตอบสนองของมนุษย์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา...2551.

4870572021 : MAJOR Mechanical Engineering

KEYWORDS : Scaling vehicle / Simulator control

KRISSADA CHUNDANG: COLLABORATION OF VEHICLE DYNAMIC SIMULATION WITH SCALING VEHICLE. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.WITAYA SUPHOPRASIT, 115 pp.

This research studies and analyses dynamic simulation of a real vehicle and a scaling vehicle. Our research involves development of a scaled vehicle that has similar dynamic behavior of a full size vehicle. This scaled vehicle is then controlled by human operator via a 3 DOF driving simulator. One of a key work is the design of a washout filter for 3 DOF driving simulator. The main purpose is to improve motion control algorithm of the simulator for virtual reality. The simulator can create rotational motion about x-axis (Roll), rotational about y-axis (Pitch), and vertical motion along z-axis (Heave). Dynamic parameters such as linear accelerations, angular velocities, steer angle, and wheel velocities are measured from sensors and fed to the main control system. The vehicle states are processed according to the washout filter which is designed based on human sensation (ex. reacting force on the back), and motion perception via a human inner-ear system.

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

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

Academic Year : 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ ผศ. ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้สละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์มาให้โดยตลอด และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบความสำเร็จได้ หากขาดความช่วยเหลืออย่างเต็มที่จากบิดา มารดา ในทุกๆด้าน ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ คณะกรรมการได้แก่ รศ. ดร.รัชทิน จันทรเจริญ ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ และ อ.ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ สำหรับคำแนะนำ นายฉัตรวุฒิ วิริยะสุธี สำหรับการเขียนโปรแกรมรับข้อมูลจากกล้องจับภาพ เพื่อตรวจวัดความเร่งของยานยนต์ย้อยส่วน นอกจากนั้นต้องขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้โอกาสเข้าร่วมโครงการวิจัย ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน และขอขอบคุณสำหรับทุกๆท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดีแก่กัน เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
2 พลศาสตร์ยานยนต์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 แกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์.....	4
2.3 แกนอ้างอิงหลัก.....	5
2.4 พลศาสตร์ของยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model).....	7
2.5 พลศาสตร์ของยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four wheels model).....	11
3 การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 ทฤษฎีของพาย.....	17
3.3 การนำเอาทฤษฎีของพายมาใช้กับพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ.....	18
3.4 การนำเอาทฤษฎีของพายมาใช้กับพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ.....	21
4 ปัจจัยและระบบการรับรู้ของมนุษย์.....	32
4.1 บทนำ.....	32

	หน้า
4.2 ระบบประสาท.....	32
4.2.1 โครงสร้างของระบบประสาท.....	33
4.2.2 ระบบประสาทส่วนกลาง (central nervous system).....	33
4.3 ระบบการทรงตัว (Equilibrium system).....	34
4.3.1 ระบบตา.....	35
4.3.2 ระบบการรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular).....	36
4.3.3 ระบบการรับรู้ของเส้นประสาทและกล้ามเนื้อ.....	42
4.3.3.1 ตัวรับสัมผัส.....	43
4.3.3.2 ชนิดการรับสัมผัส.....	43
4.4 เทรสโฮลด์ (Threshold) ของการเคลื่อนที่.....	45
5 เครื่องจำลองเสมือนจริงและสนามทดสอบย่อยส่วน.....	46
5.1 บทนำ.....	46
5.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	46
5.2.1 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X.....	46
5.2.2 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y.....	47
5.2.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z.....	47
5.3. โปรแกรมควบคุมการทำงานเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	48
5.4 การทดสอบโปรแกรมควบคุมการทำงานเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	51
5.4.1 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องจำลองเสมือนจริงเมื่อได้รับ ข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุม.....	52
5.4.2 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องจำลองเสมือนจริงเมื่อได้รับ ข้อมูลความเร่งเชิงเส้น.....	53
5.5.สนามทดสอบย่อยส่วน.....	54
5.5.1 สร้างสภาพแวดล้อมจริงย่อยส่วน.....	54
5.5.2 การสร้างสนามทดสอบจริง.....	57
5.5.3 การสร้างสภาพแวดล้อมจำลอง.....	57
6 ตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter).....	59
6.1 บทนำ.....	59
6.2 ตัวกรองแบบคลาสสิก (Classical washout).....	61

6.3 การออกแบบตัวกรองเสมือนจริงสำหรับเครื่องจำลองเสมือนจริง	
แบบ 3 องศาอิสระ.....	63
6.4 การวิเคราะห์และปรับปรุงความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้.....	67
7 ระบบควบคุมติดต่อสื่อสารและประมวลผล.....	72
7.1 บทนำ.....	72
7.2 ระบบติดต่อสื่อสาร	73
7.2.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	73
7.2.1.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลจากเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	73
7.2.1.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งข้อมูลให้เครื่องจำลองเสมือนจริง.....	75
7.2.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับยานยนต์ย่อส่วน.....	80
7.2.2.1. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งข้อมูลไปยังยานยนต์ย่อส่วน.....	80
7.2.2.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลจากยานยนต์ย่อส่วน.....	81
8 การทดสอบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล.....	84
8.1 การเปรียบเทียบข้อมูลสถานะของยานยนต์ย่อส่วน.....	84
8.2 เปรียบเทียบการทำงานระบบควบคุม Simulator แบบมี Washout algorithm	
กับแบบไม่มี Washout algorithm.....	85
8.3 การทดสอบความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จากกล้องที่ติดตั้งจากมุมสูง.....	89
9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
9.1.1 สรุปผลการวิจัยในส่วนของหัวข้อพลศาสตร์ยานยนต์.....	93
9.1.1.1 พลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model).....	93
9.1.1.2 พลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four wheels model).....	93
9.1.1.3 การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group).....	93
9.1.1.4 สรุประบบการรับรู้ของมนุษย์.....	94
9.1.1.4.1 ระบบตา (vision system).....	94
9.1.1.4.2 ระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular).....	95
9.1.1.4.3 ระบบรับรู้ของกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception).....	95
9.1.1.5 สรุปเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	96
9.1.1.6 สรุปตัวกรองเสมือนจริง.....	96
9.1.1.7 สรุประบบการติดต่อสื่อสารและประมวลผล.....	97

	หน้า
9.1.17.1 รับ-ส่งข้อมูลจากยานยนต์ย่อบส่วน.....	97
9.1.1.7.2 รับ-ส่งข้อมูลจากเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	97
9.1.1.8 สรุปการทดสอบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล.....	97
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของยานยนต์สำหรับแบบจำลองพลศาสตร์ 2 มิติ.....	24
3.2 Parameter ของรถสำหรับการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ.....	27
4.1 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของจุด 2 จุดบนผิวหนึ่งบริเวณต่างๆ โดยใช้ปลายคิปลิปหนีบกระดาษ.....	44
4.2 เธรสโฮลด์ (Threshold) ในการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์.....	45
5.1 พารามิเตอร์ในแต่ละโหมดการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	51
5.2 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างมุมที่ต้องการ (Desire angle) กับมุมที่ตรวจวัดได้ Simulator (Actual angle) ของการเคลื่อนที่เชิงมุม รอบแกน Y (Pitch angle).....	52
5.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างมุมที่ต้องการ (Desire angle) กับมุมที่ตรวจวัดได้ Simulator (Actual angle) ของการเคลื่อนที่เชิงมุม รอบแกน X (Roll angle).....	53
5.4 การเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ในการจำลองความเร่งเชิงเส้น.....	54
5.5 พื้นที่ทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	54
7.1 ความเร็วสูงสุดในการรับส่งข้อมูลของแต่ละระบบ.....	74
8.1 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z ของยานยนต์ย่อยส่วนแบบขับทดสอบ วนเป็นวงกลม(small slip angle).....	85

สารบัญภาพ

	หน้า
1.1 โครงสร้างลำดับการศึกษาค้นคว้าในงานวิจัย.....	3
2.1 การตั้งแกนอ้างอิงที่ยานยนต์.....	5
2.2 แกนอ้างอิงหลัก.....	5
2.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ บนแกนอ้างอิงหลัก.....	6
2.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ บนแกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์.....	6
2.5 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ.....	7
2.6 มุมลื่นไถล (Slip angle).....	9
2.7 การเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ.....	11
2.8 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (Four wheels model).....	12
2.9 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ขณะที่กำลังเลี้ยว (Top view).....	12
2.10 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ในระนาบ X-Z	13
2.11 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ในระนาบ Y-Z.....	13
2.12 แบบจำลองของระบบรองรับ.....	14
2.13 การเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ.....	16
3.1 มุมพวงมาลัย (Steer angle).....	25
3.2 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	25
3.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	26
3.4 เปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	26
3.5 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	26
3.6 เปรียบเทียบแรงด้านข้างระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	27
3.7 เปรียบเทียบมุมลื่นไถลระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา).....	27
3.8 มุมพวงมาลัย (Steer angle).....	28

	หน้า
3.9 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	29
3.10 เปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	29
3.11 เปรียบเทียบแรงตั้งฉากระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	29
3.12 เปรียบเทียบแรงต้านข้างที่ล้อระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	30
3.13 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งของล้อระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	30
3.14 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่จุดศูนย์กลางรถระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	30
3.15 เปรียบเทียบมุมลื่นไถลที่ล้อระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)	
กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา).....	31
4.1 ส่วนประกอบของระบบประสาทส่วนกลาง	33
4.2 สรีระกายวิภาคของตา.....	35
4.3 สรีระกายวิภาคของหู.....	36
4.4 เซมิเซอร์คิวลา คาแนล (Semicircular canal), ยูทริเคิล (Utricle), แซคคูล (Saccule).....	37
4.5 คิโนซิลเลียม (Kinocilium), สเตริโอเซิลลารี (Stereocilia).....	38
4.6 แสดงระนาบของเซมิเซอร์คิวลารี คาแนล (Semicircular canal).....	38
4.7 คริสต้า แอมพิลลารี (Crista ampullaris).....	39
4.8 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเอนโดลิมฟ์ (Endolymph).....	40
4.9 โครงสร้างของมาคิวลา (Macula).....	41
4.10 การรับรู้ถึงความเร่งเชิงเส้นของระบบอโทลิธ (Otolith).....	41
4.11 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของจุด 2 จุดบนผิวหนัง บริเวณต่างๆ โดยใช้ปลายคิ้วหนีบกระดาษ.....	45

	หน้า
5.1 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll Movement).....	46
5.2 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch Movement).....	47
5.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z.....	47
5.4 การติดต่อสื่อสารโดยรวมของระบบ.....	48
5.5 โปรแกรม 301 Control.....	49
5.6 โปรแกรม 301 Control – Scaling.....	49
5.7 โปรแกรม Manual Control.....	51
5.8 ขนาดพื้นที่ภายในห้องวิจัย.....	55
5.9 ทางขึ้นเนิน.....	55
5.10 ทางเนินขนาดขนาดเล็ก.....	56
5.11 ส่วนทางโค้ง.....	56
5.12 สนามทดสอบ.....	57
5.13 สนามทดสอบเสร็จสมบูรณ์.....	57
5.14 ถนนหินกรวดละเอียด (ซ้าย) ถนนสนามหญ้า (ขวา).....	58
5.15 สนามทดสอบและสภาพแวดล้อมย่อย.....	58
6.1 Optimal Simulator Design Problem.....	59
6.2 โครงสร้างของกระบวนการทำนายล่วงหน้า(Schematics of Predictive algorithm)....	60
6.3 Schematic diagram for sensation of Motion by classical tilt coordinate.....	61
6.4 Classical Washout.....	62
6.5 การทำงานของตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter).....	64
6.6 Washout Algorithm.....	64
6.7 โปรแกรมรับภาพจากกล้อง (ซ้าย) , กล้อง (ขวา).....	68
6.8 การติดต่อสื่อสารระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ควบคุม.....	68
6.9 ยานยนต์ย่อยส่วนที่ติดกระดาษสีเพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับกล้องจับภาพ.....	69
6.10 ภาพของยานยนต์ย่อยส่วนที่ได้จากกล้องจับภาพด้านบน.....	69
6.11 การเปรียบเทียบความยาวของเส้นที่ได้จากกล้องจับภาพด้านบน.....	70
6.12 ภาพถ่ายจากกล้องที่ติดตั้งบนเพดาน.....	71

	หน้า
7.1 ระบบควบคุม.....	72
7.2 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	73
7.3 พวงมาลัย , คันเร่ง , คันเบรก.....	74
7.4 โปรแกรมควบคุมยานพาหนะย่อยส่วน.....	74
7.5 โปรแกรมรับข้อมูลจากเกมส์ Live for speed ผ่านทาง UDP.....	75
7.6 ทดสอบการส่ง – รับข้อมูลผ่านทาง UDP.....	77
7.7 โปรแกรมภาครับข้อมูล(ด้านซ้าย) ภาคส่งข้อมูล (ด้านขวา).....	77
7.8 โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator).....	78
7.9 กำหนด Scale เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	79
7.10 สัญญาณที่ได้รับจากยานพาหนะย่อยส่วน.....	80
7.11 กระบวนการกรองสัญญาณที่ได้รับจากยานพาหนะย่อยส่วน.....	80
7.13 ลักษณะข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งไปให้กับยานพาหนะย่อยส่วน.....	81
7.14 โปรแกรมรับ - ส่ง ข้อมูลของยานยนต์ย่อยส่วน.....	81
7.15 ส่วนแสดงข้อมูลที่ได้รับพวงมาลัย คันเร่ง และเบรก บนเครื่องจำลองเสมือนจริงของโปรแกรมควบคุมระบบ.....	82
7.16 ส่วนแสดงการส่งข้อมูลทาง UDP และการกำหนดแรงบิดนกลับของพวงมาลัย บน เครื่องจำลองเสมือนจริง.....	82
7.17 ส่วนแสดงข้อมูลที่ได้รับจากกล้องจับภาพ ของโปรแกรมควบคุมระบบ.....	83
8.1 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z แบบซับซ้อนเป็นวงกลม (small slip angle).....	84
8.2 สนามทดสอบ.....	85
8.3 ข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	86
8.4 ข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	86
8.5 เปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	87
8.6 เปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ของเครื่องจำลองเสมือนจริง.....	87
8.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ย่อยส่วนบนรางเลื่อน.....	88
8.8 การเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริงในช่วงที่ยานยนต์ย่อยส่วน เริ่มเคลื่อนที่.....	88

	หน้า
8.9 การจับยึดยานยนต์ยี่ห้อส่วนเข้ากับรางเลื่อน.....	90
8.10 ความแรงเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จาก อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานยนต์ยี่ห้อส่วน (Xbow) กับกล้องมุมสูง.....	90
8.11 ความแรงเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จาก อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานยนต์ยี่ห้อส่วน (Xbow) กับกล้องมุมสูง.....	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างเครื่องจักรกลต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็ว รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีของยานพาหนะ เช่น รถยนต์ และเครื่องบิน ได้เพิ่มขีดความสามารถมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้องมีการพัฒนาทักษะความสามารถของผู้ควบคุมควบคู่กันไปด้วย เพื่อที่จะสามารถใช้งานของเครื่องจักรได้อย่างเต็มที่ จึงเป็นที่มาของการสร้างเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) โดยได้นำไปใช้ในการฝึกฝนความสามารถในการควบคุมเครื่องจักร ซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ควบคุมมากขึ้น และยังช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องจักรได้ในกรณีที่เกิดการควบคุมที่ผิดพลาดได้

โดยลักษณะของการจำลองที่พบได้ในเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ทั่วไปนั้นจะเป็นการจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (Computer graphics) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากนั้นจึงให้ผู้ควบคุมทำการควบคุมยานพาหนะให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านเหตุการณ์นั้นๆ ไปได้ ทำให้ในส่วนของโปรแกรมเหตุการณ์ต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการจำลองเหตุการณ์นั้น นักเขียนโปรแกรม (Programmer) จะต้องมีความเข้าใจถึงพฤติกรรมต่างๆ ที่จะต้องเกิดขึ้น และสามารถอธิบายพฤติกรรมนั้นได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แต่ในบางครั้งอาจจะเกิดปัญหาพบว่าในบางเหตุการณ์มีความยากที่จะอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพราะประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ ที่มากเกินไป และไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดๆ ที่จะจำลองระบบได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้การจำลองในเหตุการณ์นั้นอาจจะไม่สามารถจำลองได้เสมือนจริงนัก สำหรับปัญหานี้เราสามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนจากการจำลองเหตุการณ์ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาเป็นการนำเอายานพาหนะจริงๆ มาควบคุมโดยผู้ควบคุมจะทำการควบคุมผ่านทางเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) โดยที่ยานพาหนะนั้นได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อที่จะส่งข้อมูลกลับมาให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อที่จะจำลองสภาวะนั้นให้กับผู้ควบคุมได้ แต่ทว่าการที่จะนำเอายานพาหนะจริงมาใช้ในการควบคุมนั้นอาจจะทำให้ต้องใช้ต้นทุนที่สูง และในบางเหตุการณ์อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับยานพาหนะนั้นได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการแก้ปัญหาโดยสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนขึ้นเพื่อนำมาใช้แทนยานพาหนะจริง แต่วก่อนที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขชิ้นส่วนต่างๆ ของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน เพื่อให้ขณะที่ทำการควบคุมนั้น ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนจะให้การตอบสนองที่เหมือนกับยานพาหนะจริง ซึ่งหลังจากการปรับแต่งชิ้นส่วนแล้วจึงได้

ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ข้อมูลต่างๆลงไป เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลกลับมาที่เครื่องจำลอง เสมือนจริงได้

จุดประสงค์ของงานวิจัยคือการศึกษาและจำลองพลศาสตร์ของยานยนต์จริงกับยานยนต์ ย่อส่วน ซึ่งตัวแปรของยานพาหนะทั้งสองแบบนี้ถูกเชื่อมโยงกันด้วยทฤษฎีของความคล้ายคลึง รวมถึงการนำเอาค่าสัญญาณการตอบสนองที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ซึ่งถูกติดตั้งไว้ บนยานยนต์ย่อส่วน มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ และการ รวมกันของสัญญาณทั้งสอง เมื่อเกิดการสูญหายของสัญญาณที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ที่ติดตั้งไว้บนยานยนต์ย่อส่วน ซึ่งกรณีของการรวมสัญญาณทั้งสองนี้จำเป็นต้อง พิจารณาถึงจำนวนของข้อมูล ที่จะนำไปใช้ในการแสดงผลให้กับมนุษย์ซึ่งควบคุมอยู่ในเครื่อง จำลองเสมือนจริง (Simulator) ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงระบบการรับรู้ของมนุษย์ ซึ่งจะ เป็นตัวบ่งบอก ถึงปริมาณของข้อมูลที่แสดงผลแล้ว มนุษย์สามารถรับรู้ถึงการตอบสนองที่มีความต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาทฤษฎีที่จะนำไปใช้ในการจำลองเพื่อให้ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีการ ตอบสนองต่อการควบคุมเสมือนกับการควบคุมยานพาหนะจริง

1.2.2 ศึกษาการรับรู้ของมนุษย์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของเครื่อง จำลองเสมือนจริง (Simulator) เพื่อให้สามารถจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อส่วน เสมือนว่าผู้ควบคุมกำลังควบคุมอยู่ในยานยนต์นั่นเอง

1.2.3 ออกแบบระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับกับยานยนต์ย่อส่วน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาวิธีการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group)

1.3.2 ศึกษาพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model) และพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (4 wheels model) และทดสอบแบบจำลองในคอมพิวเตอร์

1.3.3 ศึกษาและสรุปปัจจัยการรับรู้ของมนุษย์

1.3.4 ออกแบบระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับกับยานยนต์ย่อส่วน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความเข้าใจในระเบียบวิธีการกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

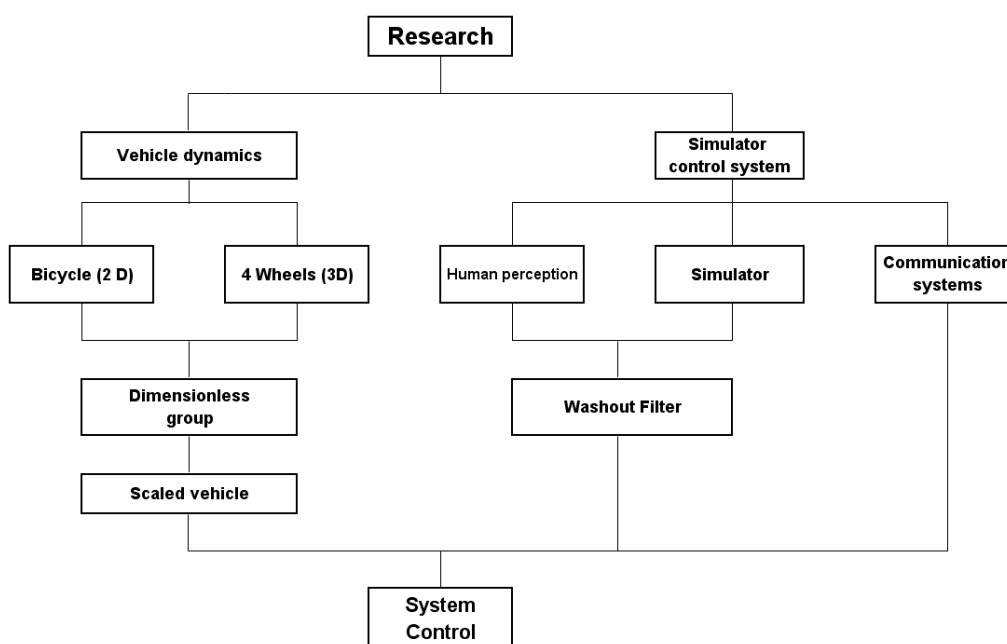
1.4.2 มีความเข้าใจในพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ และพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ

1.4.3 มีความเข้าใจในด้านการรับรู้ของมนุษย์

1.4.4 มีความเข้าใจในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ผู้วิจัยได้เรียบเรียงหัวข้อที่จะต้องศึกษาและออกแบบขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 โดยในขั้นต้น ผู้วิจัยได้แบ่งหัวข้อของงานวิจัยออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ ประกอบด้วยพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle dynamics) และระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator control system) โดยในหัวข้อของพลศาสตร์ยานยนต์สามารถแบ่งได้เป็นพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle) และพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (Four wheels) โดยความรู้จากการศึกษาพลศาสตร์ยานยนต์นี้ จะนำไปสู่การสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) และสามารถนำพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ได้จากการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติไปออกแบบยานยนต์ย่อส่วน (Scaled vehicle) เพื่อให้ยานยนต์ย่อส่วนมีการตอบสนองทางพลศาสตร์เหมือนกับยานยนต์จริง สำหรับหัวข้อการสร้างระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator control system) นี้สามารถจำแนก หัวข้อที่จะต้องศึกษาประกอบด้วย ระบบการรับรู้ของมนุษย์ (Human perception) และการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) จากนั้นจึงออกแบบตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) และระบบติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมควบคุมหลักกับเครื่องจำลองเสมือนจริง ซึ่งทำที่สุดจึงสร้างการติดต่อสื่อสารและประมวลผลของระบบโดยรวม ซึ่งโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น จะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างยานยนต์ย่อส่วนกับเครื่องจำลองเสมือนจริง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างลำดับการศึกษาหัวข้อในงานวิจัย

บทที่ 2

พลศาสตร์ยานยนต์

2.1 บทนำ

การจำลองสภาวะการขับขี่ยานยนต์ให้มีความเสมือนจริงด้วยเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ผู้วิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ ตัวแปรต่างๆที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ เช่นเมื่อเกิดอุบัติเหตุเข้าโค้ง จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ด้านข้างอย่างไร หรือเกิดการหมุนของรถอย่างไรบ้าง เป็นต้น เพื่อนำสถานะยานยนต์ที่เกิดขึ้นไปทำการประมวลผลแล้วจึงส่งข้อมูลการจำลองสถานะของยานยนต์ให้กับ Simulator

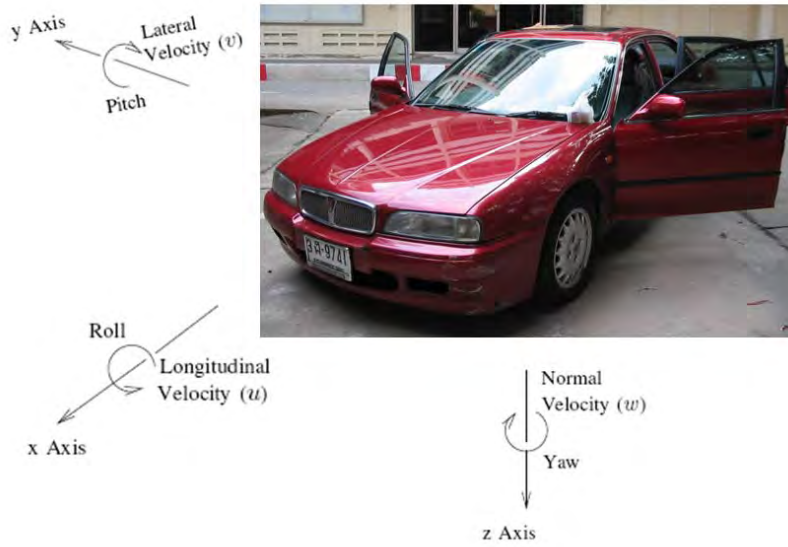
โดยพลศาสตร์ยานยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 2 แบบด้วยกันดังนี้

1. พลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model)
2. พลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four wheels model)

โดยทั้งสองแบบจะมีความแตกต่างกันคือพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ หรือ Bicycle model นั้น จะเป็นการจำลองพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของรถอย่างง่าย ซึ่งจะมีตัวแปรอิสระ (Degree of freedom) 2 ตัวแปรคือ การเคลื่อนที่ด้านข้าง (Lateral motion) และการหมุนของรถรอบแกน Z (Yaw motion) แต่สำหรับพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ หรือ Four wheels model นั้นจะเป็นการพิจารณาสมการพลศาสตร์ยานยนต์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนที่ด้านข้าง (Lateral motion) , การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical motion) , การหมุนของรถรอบแกน X (Roll motion) , การหมุนรอบแกน Y (Pitch motion) , การหมุนรอบแกน Z (Yaw motion) โดยทั้งสองแบบจะพิจารณาในสภาวะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (longitudinal velocity constant) โดยแกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณนี้จะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ ดังนี้

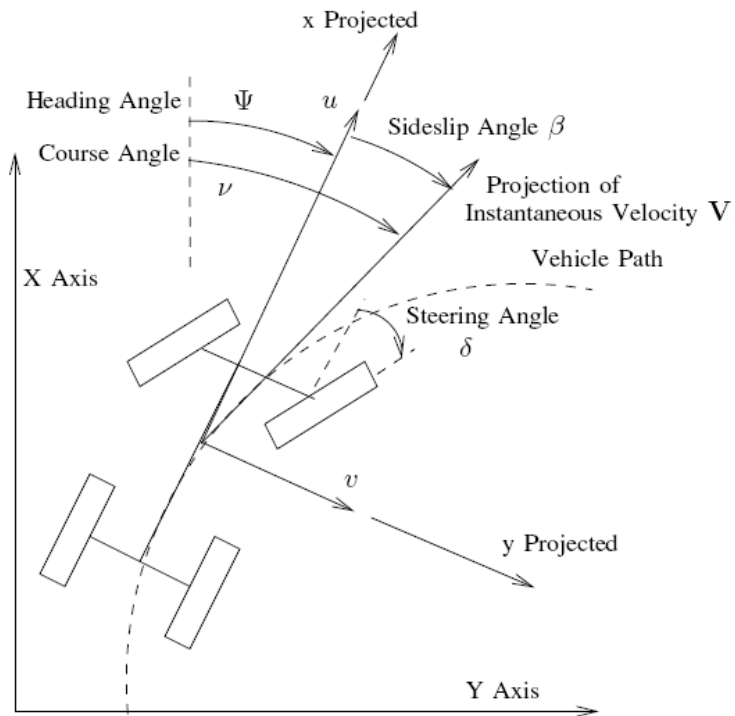
2.2 แกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์ (Body fixed coordinate)

แกนอ้างอิงแบบนี้จะยึดติดไปกับยานยนต์ และเคลื่อนที่ไปด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การใช้แกนอ้างอิงแบบนี้จะทำให้แรงต่างๆที่เกิดขึ้นกับยานยนต์นั้น สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น เช่น การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับพื้นถนนนั้น สามารถคำนวณได้โดยอาศัยมุมเลี้ยวของล้อ กับมุมความเร็วล้อ



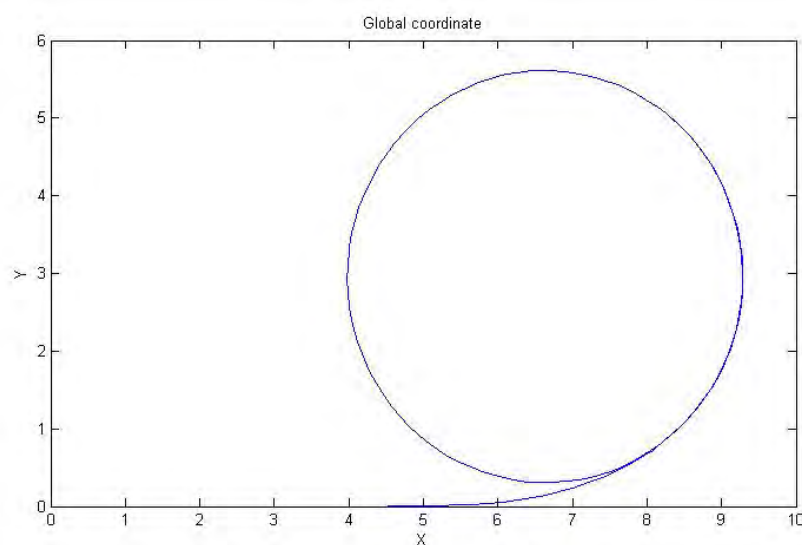
รูปที่ 2.1 การตั้งแกนอ้างอิงที่ยานยนต์

2.3 แกนอ้างอิงหลัก (Global coordinate)

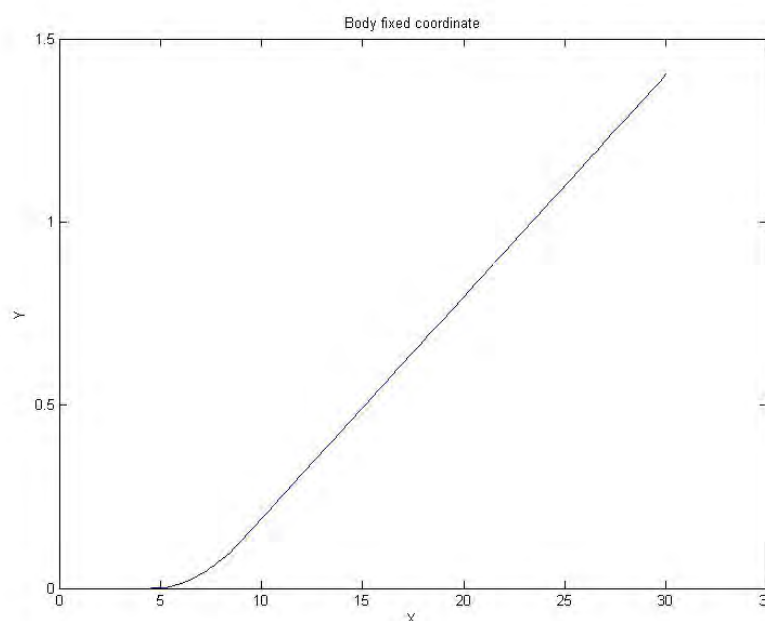


รูปที่ 2.2 แกนอ้างอิงหลัก, [1]

การคำนวณสถานะของยานยนต์ เช่น ความเร็วด้านข้าง, ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z โดยปกติแล้วมักใช้แกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์ แต่สำหรับการพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์แล้ว จะใช้แกนอ้างอิงหลัก เนื่องจากการคำนวณโดยใช้แกนอ้างอิงหลัก จะเปรียบเสมือนมีผู้สังเกตการณ์ ซึ่งยืนอยู่กับที่ คอยสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของยานยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์บนแกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์ ในรูปที่ 2.2



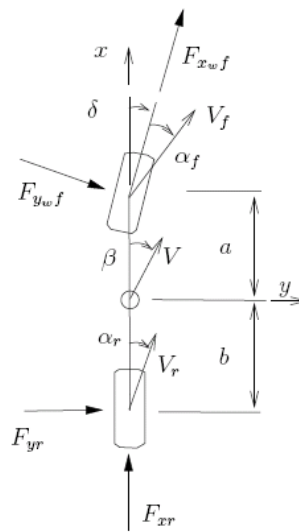
รูปที่ 2.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ บนแกนอ้างอิงหลัก



รูปที่ 2.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ บนแกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์

2.4 พลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model)

สำหรับการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ นี้ได้มีการนำไปใช้สำหรับการพัฒนาระบบควบคุมรถในหลายงานวิจัย [2] , [3] โดยจะเป็นการจำลองในสถานะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (Constant longitudinal velocity) และไม่คำนึงถึงการหมุนของยานยนต์รอบแกน X (Roll motion) และการหมุนของยานยนต์รอบแกน Y (Pitch motion) และพิจารณาการเคลื่อนที่และแรงที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านซ้ายและขวามีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถที่จะพิจารณาสถานะต่างๆที่เกิดขึ้นของล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา ให้เหลือเพียงล้อเดียวได้ ทำให้เหลือล้อจากเดิม 4 ล้อเหลือเพียง 2 ล้อ โดยมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.5 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ [1]

ในขณะที่

a	หมายถึง	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของยานยนต์กับตำแหน่งล้อหน้า
b	หมายถึง	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของยานยนต์กับตำแหน่งล้อหลัง
δ	หมายถึง	มุมของพวงมาลัย
β	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle) ที่จุดศูนย์กลางของรถยนต์
V	หมายถึง	ทิศทางความเร็วของจุดศูนย์กลางรถยนต์
α_f	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle) ที่ล้อหน้า
α_r	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle) ที่ล้อหลัง
V_f	หมายถึง	ทิศทางความเร็วของล้อหน้า
V_r	หมายถึง	ทิศทางความเร็วของล้อหลัง

F_{ywf}	หมายถึง	แรงที่กระทำด้านข้าง (Lateral force) ของล้อหน้า
F_{yr}	หมายถึง	แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหลัง
F_{xwf}	หมายถึง	แรงที่กระทำในแนวตามยาว (Longitudinal force) ของล้อหน้า
F_{xr}	หมายถึง	แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหลัง

จากกฎของ Newton จะได้ว่า

$$ma_x = F_{xwf} \cos \delta - F_{ywf} \sin \delta + F_{xr} \quad (2.1)$$

$$ma_y = F_{ywf} \cos \delta + F_{xwf} \sin \delta + F_{yr} \quad (2.2)$$

$$I_z \dot{r} = aF_{ywf} \cos \delta + aF_{xwf} \sin \delta - bF_{yr} \quad (2.3)$$

ในขณะที่

$$a_y = \dot{v} + ru \quad (2.4)$$

I_z หมายถึง โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) รอบแกน Z

r หมายถึง ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z (Yaw rate)

m หมายถึง มวลของยานยนต์

โดยพิจารณาที่สถานะที่ยานยนต์กำลังวิ่งไปด้านหน้าด้วยความเร็วคงที่ สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m}\right)(F_{ywf} \cos \delta + F_{yr}) \quad (2.5)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z}\right)(aF_{ywf} \cos \delta - bF_{yr}) \quad (2.6)$$

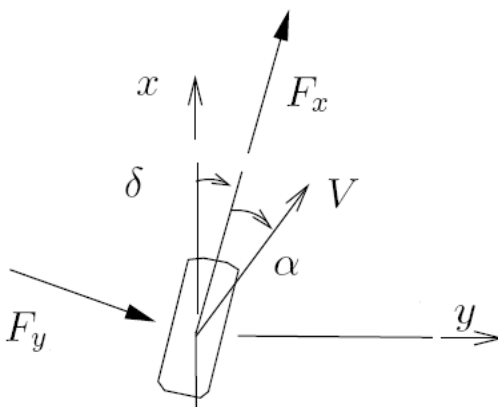
ความเร็วล้อหน้า แกน X เท่ากับ u

ความเร็วล้อหน้า แกน Y เท่ากับ $v + ar$

ความเร็วล้อหลัง แกน X เท่ากับ u

ความเร็วล้อหลัง แกน Y เท่ากับ $v - br$

จากค่าทั้งสองนี้ สามารถคำนวณหามุมลื่นไถล (Slip angle) ได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 มุมลื่นไถล (Slip angle)

$$\alpha_f = \delta_f - \tan^{-1}\left(\frac{v + ar}{u}\right) \quad (2.7)$$

$$\alpha_r = \delta_r - \tan^{-1}\left(\frac{v - br}{u}\right) \quad (2.8)$$

ในขณะ	α_f	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle) ของล้อหน้า
	α_r	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle) ของล้อหลัง
	δ_f	หมายถึง	มุมเลี้ยวของล้อหน้า
	δ_r	หมายถึง	มุมเลี้ยวของล้อหลัง

สามารถคำนวณหาค่าแรงกระทำด้านข้างของล้อรถ (F_y) ได้จาก

$$F_y = C_\alpha \alpha \quad (2.9)$$

ในขณะ	C_α	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นขณะเข้าโค้ง (Cornering stiffness)
	α	หมายถึง	มุมลื่นไถล (Slip angle)

เมื่อนำสมการที่ (2.7) และ (2.8) แทนค่าลงในสมการ (2.9) จะได้

$$F_{yf} = 2C_{cf} \left(\delta_f - \left[\frac{v+ar}{u} \right] \right) \quad (2.10)$$

$$F_{yr} = 2C_{cr} \left(\delta_r - \left[\frac{v-br}{u} \right] \right) \quad (2.11)$$

เนื่องจากเงื่อนไขในการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ ประกอบด้วย

- สภาวะความเร็ว (forward velocity) มีค่าคงที่ ดังนั้นแรง F_x จึงมีค่าเท่ากับศูนย์
- มุมเลี้ยวน้อย
- แรงที่เกิดขึ้นด้านซ้ายและขวามีความสมมาตรกัน

ทำให้สมการ (2.1) จึงไม่มีความจำเป็น และสามารถประมาณให้ $\cos \delta \approx 1$ และ $\sin \delta \approx 0$ ซึ่งมีผลให้เทอม $F_{ywf} \sin \delta$ นั้นจะเป็นค่าจำนวนน้อยที่คูณกัน และสามารถประมาณให้เป็นศูนย์ได้ กำหนดให้ $\delta_r = 0$ เพราะไม่ได้ควบคุมมุมของล้อหลัง ดังนั้นจากสมการ (2.5) และ (2.6) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{yf} + F_{yr}) \quad (2.12)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z} \right) (aF_{yf} - bF_{yr}) \quad (2.13)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.10) และ (2.11) แทนลงในสมการที่ (2.12) และ (2.13) โดย

$$\dot{v} = \left(\frac{2C_{cf} + 2C_{cr}}{mu} \right) v + \left(\frac{2aC_{cf} - 2bC_{cr}}{mu} - u \right) r - \left(\frac{2C_{cf}}{m} \right) \delta_f \quad (2.14)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{2aC_{cf} - 2bC_{cr}}{I_z u} \right) v + \left(\frac{2a^2 C_{cf} + 2b^2 C_{cr}}{I_z u} \right) r - \left(\frac{2aC_{cf}}{I_z} \right) \delta_f \quad (2.15)$$

ซึ่งสมการทั้งสองนี้สามารถพบได้ใน [2] , [3] , [4] และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ state space [2] ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_0}{u} & -\left(v + \frac{C_1}{mu} \right) \\ -\frac{C_1}{I_z u} & -\frac{C_2}{I_z u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2C_{cf}}{m} \\ -\frac{2aC_{cf}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (2.16)$$

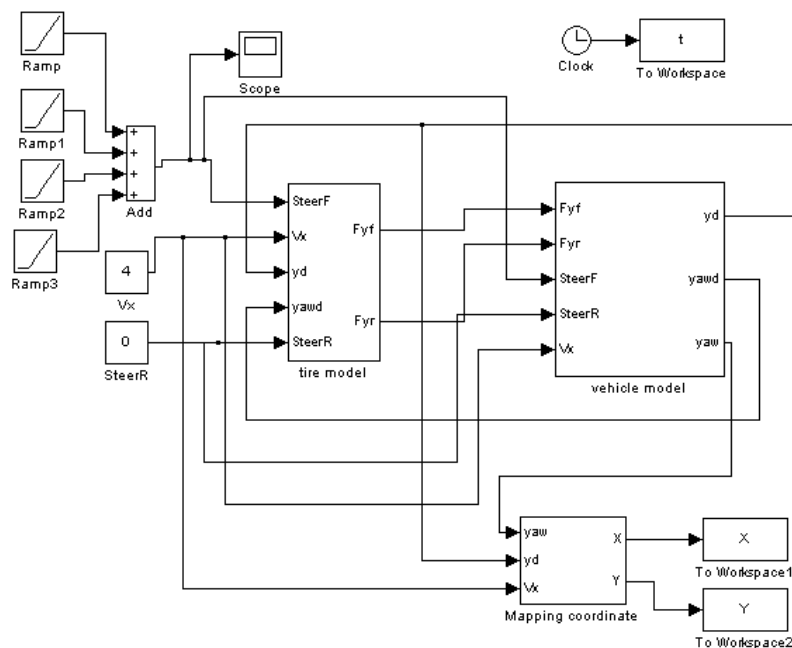
ในขณะที

$$C_0 = -2(C_{cf} + C_{cr})$$

$$C_1 = -2(aC_{cf} - bC_{cr})$$

$$C_2 = -2(a^2C_{cf} + b^2C_{cr})$$

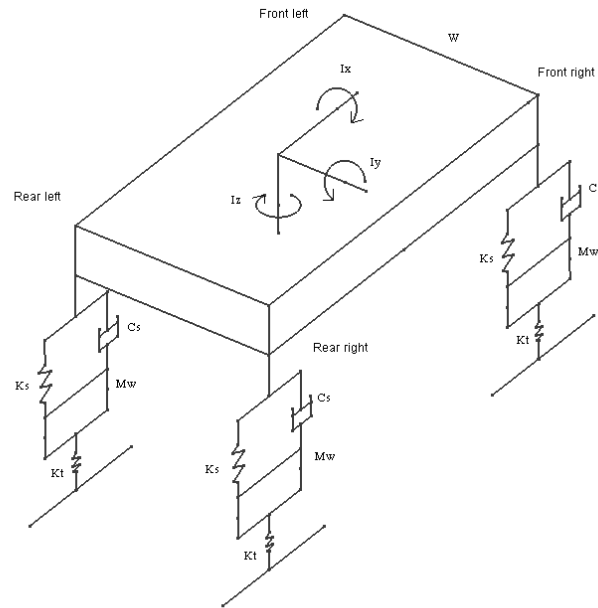
จากนั้นจึงได้นำไปเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ ด้วยโปรแกรมของ MATLAB ดังรูป



รูปที่ 2.7 การเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ

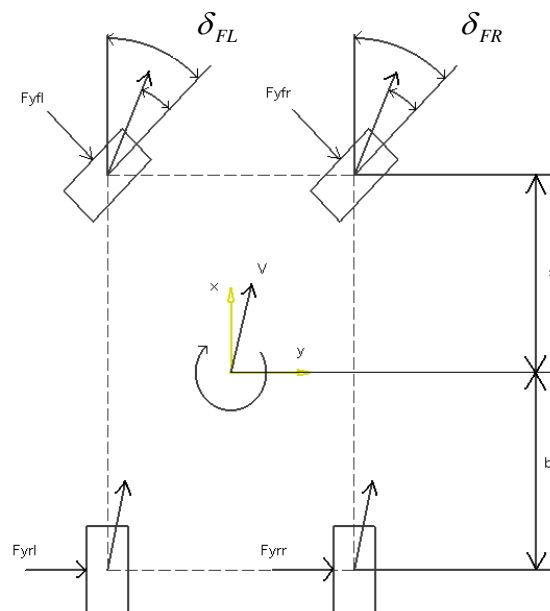
2.5 พลศาสตร์ของยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four wheels model)

สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติจะมีความซับซ้อนมากกว่าการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ เนื่องจากตัวแปรที่พิจารณามีจำนวนมาก เช่น แรงที่เกิดขึ้นที่ล้อทั้งสี่, ตำแหน่งและความเร็วของจุดศูนย์กลางของรถ, มุมและความเร็วของการเอียงหน้าหลัง (Pitch movement), มุมและความเร็วของการเอียงซ้ายและขวา (Roll movement) โดยเป็นการจำลองในสภาวะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปข้างหน้าแบบคงที่, แรงที่เกิดขึ้นที่ล้อมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น และมีสัญญาณเข้าคือ ความเร็วของยานยนต์และมุมเลี้ยวของล้อหน้า

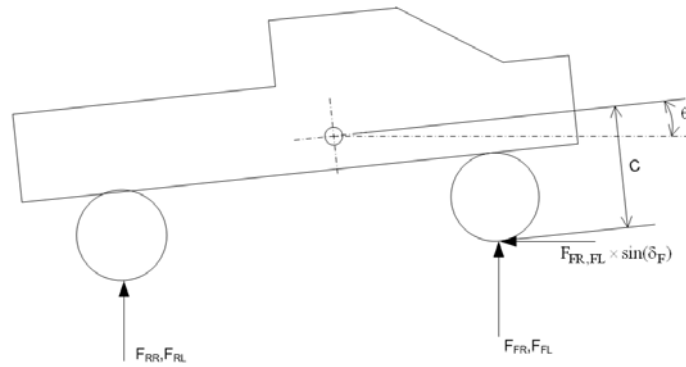


รูปที่ 2.8 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (Four wheels model)

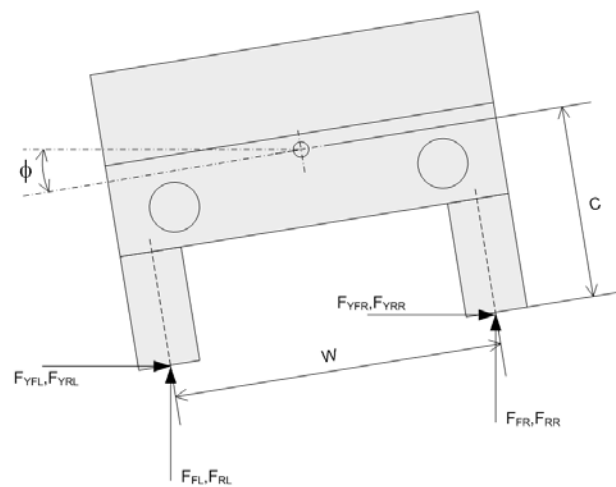
โดยเราสามารถแสดงแรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อ ขณะที่ยานยนต์กำลังเลี้ยว ดังรูป



รูปที่ 2.9 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ขณะที่กำลังเลี้ยว (Top view)



รูปที่ 2.10 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ในระนาบ X-Z



รูปที่ 2.11 แรงต่างๆที่เกิดขึ้นที่ล้อของยานยนต์ ในระนาบ Y-Z

จากรูปเราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\dot{v} = -\dot{r}u + \frac{1}{M}(F_{YFL} \cos \delta + F_{YFR} \cos \delta + F_{YRL} + F_{YRR}) \quad (2.17)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z} \left[\frac{W}{2} (-F_{YFL} \sin \delta + F_{YFR} \sin \delta) + a(F_{YFL} \cos \delta + F_{YFR} \cos \delta) - b(F_{YRL} + F_{YRR}) \right] \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \dot{q} = & \frac{1}{I_y} (a(F_{FL} + F_{FR}) - b(F_{RL} + F_{RR}) - (F_{YFR} \sin \delta) \left(c + a\theta - \frac{W}{2}\phi \right) + \dots \\ & \dots - (F_{YFL} \sin \delta) \left(c + a\theta + \frac{W}{2}\phi \right)) \end{aligned} \quad (2.19)$$

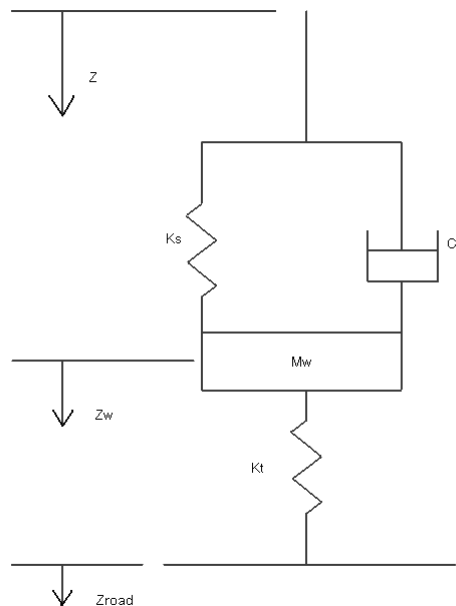
$$\begin{aligned} \dot{p} = & \frac{1}{I_x} \left(\frac{W}{2} (F_{FL} + F_{RL}) - \frac{W}{2} (F_{FR} + F_{RR}) - (F_{YFL} \cos \delta) \left(c + a\theta + \frac{W}{2} \phi \right) + \dots \right. \\ & \left. \dots - (F_{YFL} \sin \delta) \left(c + a\theta - \frac{W}{2} \phi \right) - F_{YRL} \left(c - b\theta + \frac{W}{2} \phi \right) - F_{YRR} \left(c - b\theta - \frac{W}{2} \phi \right) \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

สามารถคำนวณแรงที่เกิดด้านข้าง (Lateral force) ได้จากสมการที่ (2.9) ในขณะที่

$$\alpha_{FR} = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u - \frac{W}{2} r} \right), \quad \alpha_{FL} = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u + \frac{W}{2} r} \right)$$

$$\alpha_{RR} = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v - ar}{u - \frac{W}{2} r} \right), \quad \alpha_{RL} = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v - ar}{u + \frac{W}{2} r} \right)$$

สามารถคำนวณค่าแรงที่กระทำกับล้อรถในแนวตั้ง โดยจะมีผลของระบบรองรับการ
สั่นสะเทือน (Suspension) ซึ่งมี Spring และ Damper สามารถคิดได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของระบบรองรับ

โดยแรงที่กระทำซึ่งส่งผ่านมาจากระบบรองรับสามารถหาได้จาก

$$F_{FR} = -K_{SF}(Z_{FR} - Z_{WFR}) - C_{SF}(\dot{Z}_{FR} - \dot{Z}_{WFR}) \quad (2.21)$$

$$F_{FL} = -K_{SF}(Z_{FL} - Z_{WFL}) - C_{SF}(\dot{Z}_{FL} - \dot{Z}_{WFL}) \quad (2.22)$$

$$F_{RR} = -K_{SR}(Z_{RR} - Z_{WRR}) - C_{SR}(\dot{Z}_{RR} - \dot{Z}_{WRR}) \quad (2.23)$$

$$F_{RL} = -K_{SR}(Z_{RL} - Z_{WRL}) - C_{SR}(\dot{Z}_{RL} - \dot{Z}_{WRL}) \quad (2.24)$$

การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางของยานยนต์ได้เท่ากับ

$$M\ddot{Z}_{CG} = -F_{FR} - F_{FL} - F_{RR} - F_{RL} \quad (2.25)$$

และการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมุมรถทั้งสิ้นได้

$$Z_{FR} = Z_{CG} - a\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (2.26)$$

$$Z_{FL} = Z_{CG} - a\theta - \frac{W}{2}\phi \quad (2.27)$$

$$Z_{RR} = Z_{CG} + b\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (2.28)$$

$$Z_{RL} = Z_{CG} + b\theta - \frac{W}{2}\phi \quad (2.29)$$

และการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของล้อรถได้จาก

$$M_W\ddot{Z}_{WFR} = C_S(\dot{Z}_{FR} - \dot{Z}_{WFR}) + K_S(Z_{FR} - Z_{WFR}) - K_T(Z_{WFR} - Z_{road}) \quad (2.30)$$

$$M_W\ddot{Z}_{WFL} = C_S(\dot{Z}_{FL} - \dot{Z}_{WFL}) + K_S(Z_{FL} - Z_{WFL}) - K_T(Z_{WFL} - Z_{road}) \quad (2.31)$$

$$M_W\ddot{Z}_{WRR} = C_S(\dot{Z}_{RR} - \dot{Z}_{WRR}) + K_S(Z_{RR} - Z_{WRR}) - K_T(Z_{WRR} - Z_{road}) \quad (2.32)$$

$$M_W\ddot{Z}_{WRL} = C_S(\dot{Z}_{RL} - \dot{Z}_{WRL}) + K_S(Z_{RL} - Z_{WRL}) - K_T(Z_{WRL} - Z_{road}) \quad (2.33)$$

ดังนั้นเราจึงสามารถหาแรงในแนวดิ่งที่กระทำกับยางได้ เท่ากับ

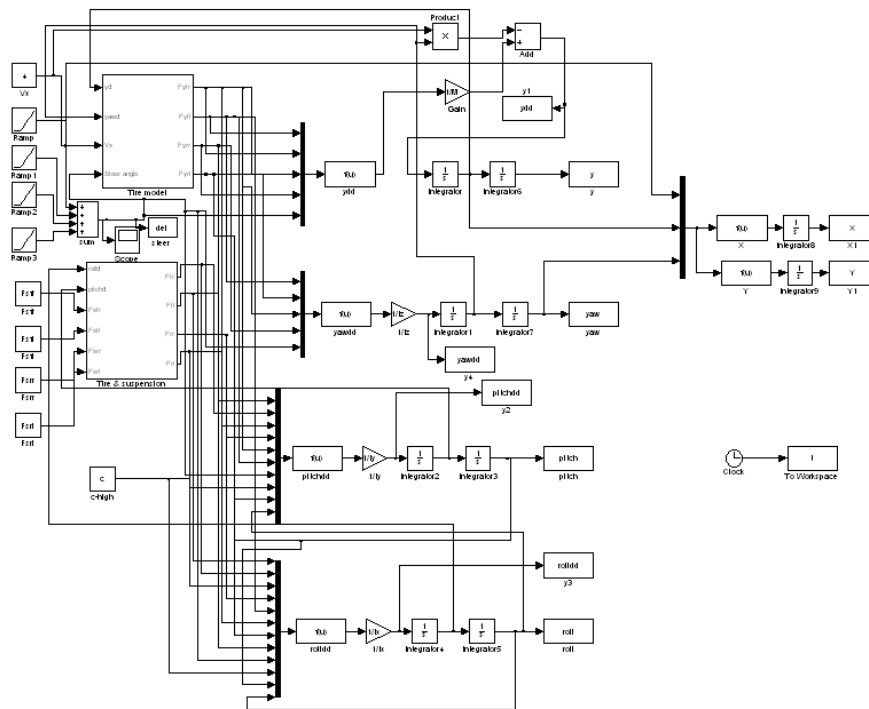
$$F_{ZFR} = K_T(Z_{WFR} - Z_{road}) \quad (2.34)$$

$$F_{ZFL} = K_T(Z_{WFL} - Z_{road}) \quad (2.35)$$

$$F_{ZRR} = K_T (Z_{WRR} - Z_{road}) \quad (2.36)$$

$$F_{ZRL} = K_T (Z_{WRL} - Z_{road}) \quad (2.37)$$

จากนั้นจึงได้นำไปเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองระบบ dynamics ด้วยโปรแกรมของ MATLAB ดังรูป



รูปที่ 2.13 การเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ

บทที่ 3

การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

3.1 บทนำ

ในการปฏิบัติงานของวิศวกร บางครั้งอาจพบปัญหาเกี่ยวกับความซับซ้อนของสมการต่างๆ ซึ่งบ่อยครั้งต้องอาศัยการทดสอบ (experimentation) เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือ โดยในการทดสอบส่วนมาก เพื่อเป็นการประหยัดเงิน และเวลาจึงได้มีการทดสอบในรูปแบบย่อส่วน (Scale) โดยจะอ้างอิงจากขนาดเดิม (Prototype) ดังนั้นเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือจึงได้นำเอาวิธีการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) มาใช้ในการออกแบบกรรมวิธีการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอาการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ทฤษฎีของพายมาสร้างยานยนต์ย่อส่วน เพื่อให้ยานยนต์ย่อส่วนมีการตอบสนองที่เหมือนกับยานยนต์จริง โดยวิธีการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ มีดังนี้

3.2 ทฤษฎีของพาย

ขั้นที่ 1

เขียนตัวแปรทั้งหมดที่มีอยู่ในสมการ ซึ่งจะประกอบไปด้วยตัวแปรที่มีมิติ เช่น เมตร วินาที เป็นต้น และตัวแปรที่ไร้มิติ เช่น ค่ามุมองศา หรือเรเดียน เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนับจำนวนของตัวแปรทั้งหมด และกำหนดให้เท่ากับ n

ขั้นที่ 2

เลือกตัวแปรที่จะนำมาเพื่อใช้ในการทำซ้ำ ซึ่งกำหนดจำนวนให้เป็น j

ขั้นที่ 3

คำนวณหาจำนวนค่า Π (k) ที่ต้องใช้ได้จาก

$$k = n - j$$

ขั้นที่ 4

คำนวณค่า Π ในแต่ละกลุ่มจนครบ

ขั้นที่ 5

ตรวจสอบ Π แต่ละกลุ่มที่คำนวณได้เพื่อให้แน่ใจว่ามีความถูกต้องจริง

3.3 การนำเอาทฤษฎีของพายมาใช้กับพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ

งานวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีของพายมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างยานยนต์จริง (Prototype) กับยานยนต์ย่อส่วน (Scale) ซึ่งสามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\dot{v} = \left(\frac{2C_{cf} + 2C_{cr}}{mu} \right) v + \left(\frac{2aC_{cf} - 2bC_{cr}}{mu} - u \right) r - \left(\frac{2C_{cf}}{m} \right) \delta_f \quad (2.14)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{2aC_{cf} - 2bC_{cr}}{I_z u} \right) v + \left(\frac{2a^2 C_{cf} + 2b^2 C_{cr}}{I_z u} \right) r - \left(\frac{2aC_{cf}}{I_z} \right) \delta_f \quad (2.15)$$

ขั้นที่ 1

เขียนตัวแปรทั้งหมดที่มีอยู่ในสมการที่ (2.14)-(2.15) ได้ดังนี้

1. m	หน่วย	kg
2. a	หน่วย	m
3. b	หน่วย	m
4. I_z	หน่วย	$kg \times m^2$
5. C_{cf}	หน่วย	N/rad
6. C_{cr}	หน่วย	N/rad
7. u	หน่วย	m/s
8. $L = a + b$	หน่วย	m

โดยตัวแปร δ ที่มีอยู่ในสมการข้างต้นนั้นหมายถึง มุมพวงมาลัย (steer angle) ตัวแปรนี้จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากมีหน่วยเป็นองศา ซึ่งถือว่าตัวแปรไร้มิติ และจากตัวแปรข้างบนทั้งหมดนับรวมตัวแปรที่มีมิติได้เท่ากับ 8 ดังนั้น $n = 8$ โดยสังเกตได้ว่าสมการ (2.14), (2.15) จะมีหน่วยพื้นฐานทั้งหมด 3 หน่วยด้วยกัน ประกอบด้วย น้ำหนัก (Mass, kg) , ระยะทาง (Length, m) , เวลา (Time, s)

ขั้นที่ 2

เลือกตัวแปรที่ใช้ในการทำซ้ำ โดยตัวแปรที่ใช้ในการทำซ้ำต้องครอบคลุมหน่วยพื้นฐานของสมการ ซึ่งในที่นี้เราได้เลือกตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐานทั้งสาม ได้แก่ m , L , u ($j = 3$)

ขั้นที่ 3

คำนวณหาจำนวนกลุ่มของพายได้จาก

$$k = n - j = 8 - 3 = 5$$

ขั้นที่ 4

ทำการจัดกลุ่มโดยกลุ่มแรกเลือกให้เป็น a ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร

$$a(m)^x (L)^y (u)^z = (ki \log ram)^0 (time)^0 (length)^0$$

จะได้

$$\text{Mass} \quad x = 0$$

$$\text{Length} \quad 1 + y + z = 0$$

$$\text{Time} \quad -z = 0$$

$$\text{ดังนั้น} \quad y = -1$$

สุดท้ายได้

$$\Pi_1 = \frac{a}{L} \quad (3.5)$$

จากนั้นจึงจัดกลุ่มต่อมา b ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร โดยทำในลักษณะเดียวกันกับกลุ่มแรก สุดท้ายได้

$$\Pi_2 = \frac{b}{L} \quad (3.6)$$

จากนั้นจึงจัดกลุ่มต่อมาก็คือ C_{cf} ซึ่งมีหน่วยเป็น N/rad หรือ $kg \times \frac{m}{s^2}$

$$C_{cf} (m)^x (L)^y (u)^z = (ki \log ram)^0 (time)^0 (length)^0$$

$$\text{Mass} \quad 1 + x = 0$$

$$\text{Length} \quad 1 + y + z = 0$$

$$\text{Time} \quad -2 - z = 0$$

แก้สมการได้

$$\begin{aligned}x &= -1 \\y &= 1 \\z &= -2\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\Pi_3 = \frac{C_{cf} L}{\mu u^2} \quad (3.7)$$

จากนั้นจึงจัดกลุ่มต่อมาเป็น C_{cf} ซึ่งมีหน่วยเป็น N/rad หรือ $kg \times \frac{m}{s^2}$ ได้ดังนี้

$$\Pi_4 = \frac{C_{cf} L}{\mu u^2} \quad (3.8)$$

กลุ่มสุดท้ายคือตัวแปร I_z ซึ่งมีหน่วยเป็น $kg \times m^2$

$$I_z (m)^x (L)^y (u)^z = (kilogram)^0 (time)^0 (length)^0$$

จะได้

$$\begin{aligned}\text{Mass} & \quad 1 + x = 0 \\ \text{Length} & \quad 2 + y + z = 0 \\ \text{Time} & \quad -z = 0\end{aligned}$$

แก้สมการได้

$$\begin{aligned}x &= -1 \\y &= -2 \\z &= 0\end{aligned}$$

เราจะได้

$$\Pi_5 = \frac{I_z}{mL^2} \quad (3.9)$$

3.4 การนำเอาทฤษฎีของพายมาใช้กับพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ

ชั้นที่ 1

จากสมการที่ (2.17) , (2.18) , (2.19) และ (2.20) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมีดังนี้

1. M	มีหน่วยเป็น	kg	
2. M_w	มีหน่วยเป็น	kg	
3. a	มีหน่วยเป็น	m	
4. b	มีหน่วยเป็น	m	
5. L	มีหน่วยเป็น	m	
6. K_T	มีหน่วยเป็น	N/m	หรือ kg/s^2
7. K_{sr}	มีหน่วยเป็น	N/m	หรือ kg/s^2
8. K_{sf}	มีหน่วยเป็น	N/m	หรือ kg/s^2
9. C_{sf}	มีหน่วยเป็น	$\frac{N}{m/s}$	หรือ kg/s
10. C_{sr}	มีหน่วยเป็น	$\frac{N}{m/s}$	หรือ kg/s
11. W	มีหน่วยเป็น	m	
12. c	มีหน่วยเป็น	m	
13. C_f	มีหน่วยเป็น	N/rad	หรือ $kg \times m/s^2$
14. C_r	มีหน่วยเป็น	N/rad	หรือ $kg \times m/s^2$
15. I_z	มีหน่วยเป็น	$kg \times m^2$	
16. I_y	มีหน่วยเป็น	$kg \times m^2$	
17. I_x	มีหน่วยเป็น	$kg \times m^2$	
18. u	มีหน่วยเป็น	m/s	

รวมทั้งหมดได้ $n = 18$

ชั้นที่ 2

เลือกตัวแปรที่ใช้ในการทำซ้ำ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐานทั้งสาม ได้แก่ m , L , u ($j = 3$)

ชั้นที่ 3

คำนวณหาจำนวนกลุ่มของพายได้จาก

$$k = n - j = 18 - 3 = 15$$

ชั้นที่ 4

ในชั้นตอนนี้จะเป็นการจัดกลุ่มของพายทั้งหมด 15 กลุ่ม ดังนี้

M_w

$$M_w (m)^x (L)^y (u)^z = (ki \log ram)^0 (time)^0 (length)^0$$

$$\text{Mass} \quad 1 + x = 0$$

$$\text{Length} \quad y + z = 0$$

$$\text{Time} \quad -2 - z = 0$$

$$\text{ดังนั้น} \quad x = -1$$

$$\text{เราจะได้} \quad \Pi_1 = \frac{M_w}{M}$$

การจัดกลุ่มตัวแปร a

a สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ

$$\text{ซึ่ง สุดท้ายเราจะได้} \quad \Pi_2 = \frac{a}{L}$$

การจัดกลุ่มตัวแปร b

b สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ

$$\text{ซึ่ง สุดท้ายเราจะได้} \quad \Pi_3 = \frac{b}{L}$$

การจัดกลุ่มตัวแปร K_T

$$K_T (m)^x (L)^y (u)^z = (ki \log ram)^0 (time)^0 (length)^0$$

$$\text{Mass} \quad 1 + x = 0$$

$$\text{Length} \quad y + z = 0$$

Time $-2 + z = 0$

ดังนั้น $x = -1$

$$y = 2$$

$$z = -2$$

เราจะได้ $\Pi_4 = \frac{K_T L^2}{Mu^2}$

K_{sr} สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับ K_T ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_5 = \frac{K_{sr} L^2}{Mu^2}$

K_{sf} สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับ K_T ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_6 = \frac{K_{sf} L^2}{Mu^2}$

C_{sf}

$$C_{sf} (m)^x (L)^y (u)^z = (ki \log ram)^0 (time)^0 (length)^0$$

Mass $1 + x = 0$

Length $y + z = 0$

Time $-1 - z = 0$

ดังนั้น $x = -1$

$$y = 1$$

$$z = -1$$

เราจะได้ $\Pi_7 = \frac{C_{sf} L}{Mu}$

C_{sr} สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับ C_{sf} ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_8 = \frac{C_{sr} L}{Mu}$

W สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_9 = \frac{W}{L}$

c สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ

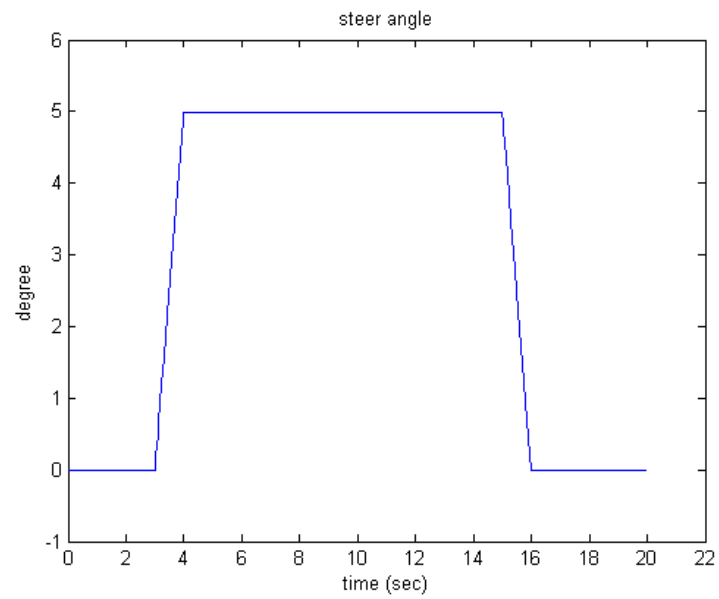
- ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{10} = \frac{c}{L}$
- C_f สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ
ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{11} = \frac{C_f L}{Mu^2}$
- C_r สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ
ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{12} = \frac{C_r L}{Mu^2}$
- I_z สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติของพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ
ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{13} = \frac{I_z}{ML^2}$
- I_y สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับ I_z ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{14} = \frac{I_y}{ML^2}$
- I_x สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับ I_z ซึ่งสุดท้ายเราจะได้ $\Pi_{15} = \frac{I_x}{ML^2}$

จากนั้นจึงได้ทำการคำนวณพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB เพื่อเปรียบเทียบค่าสถานะของยานยนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างยานยนต์ต้นแบบ (Prototype) กับยานยนต์ย่อส่วน (Scale) ดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของยานยนต์สำหรับแบบจำลองพลศาสตร์ 2 มิติ (Bicycle model), [1]

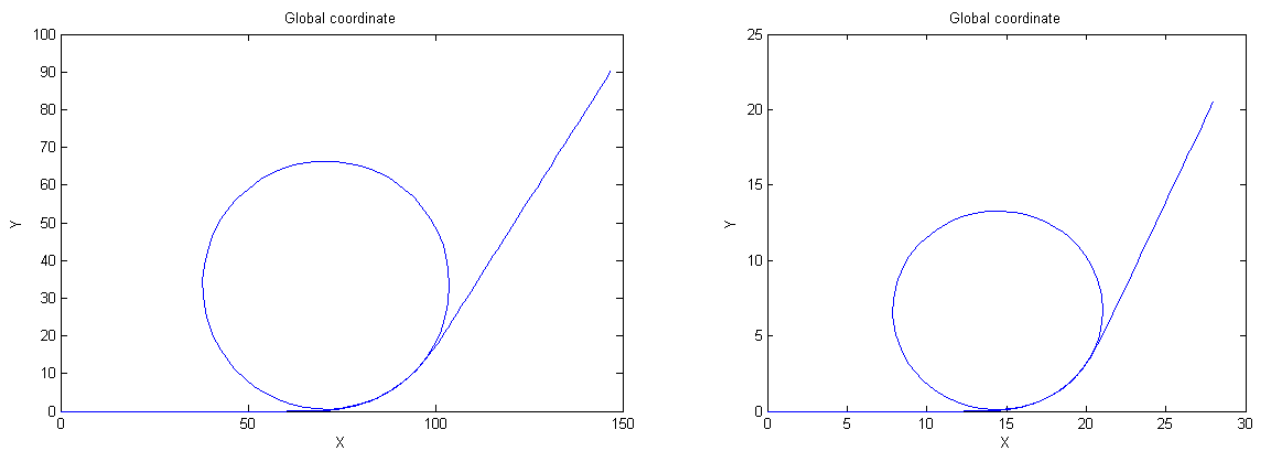
parameter	Prototype	Model (scale 1:5)
a	1.25	0.25
b	1	0.2
L	2.25	0.45
m	1100	8.8
Iz	1100	0.352
Cf	60,000	100
Cr	120,000	200
V	20	4

ข้อมูลที่ป้อนให้กับการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ ประกอบด้วยความเร็วไปข้างหน้า และมุมพวงมาลัย โดยข้อมูลพวงมาลัยมีลักษณะ Ramp ซึ่งเริ่มหมุนพวงมาลัยที่วินาทีที่ 3 หมุนไป 5 องศา จากนั้นจึงหมุนพวงมาลัยกลับที่วินาทีที่ 15 ดังรูป

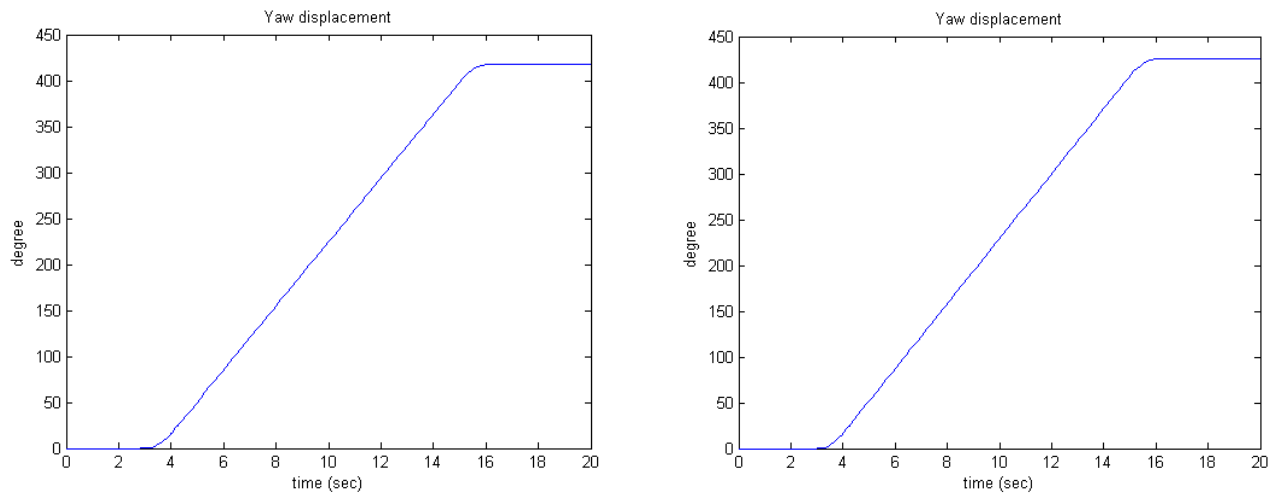


รูปที่ 3.1 มุมพวงมาลัย (Steer angle)

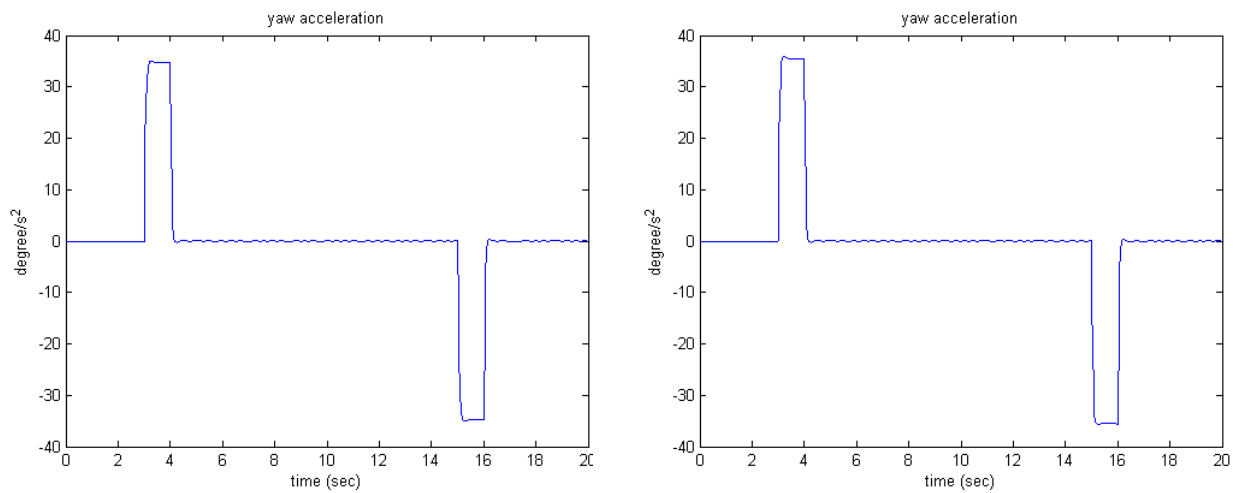
ผลลัพธ์การตอบสนองของยานยนต์ต้นแบบกับยานยนต์ย่อส่วนที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab มีดังนี้



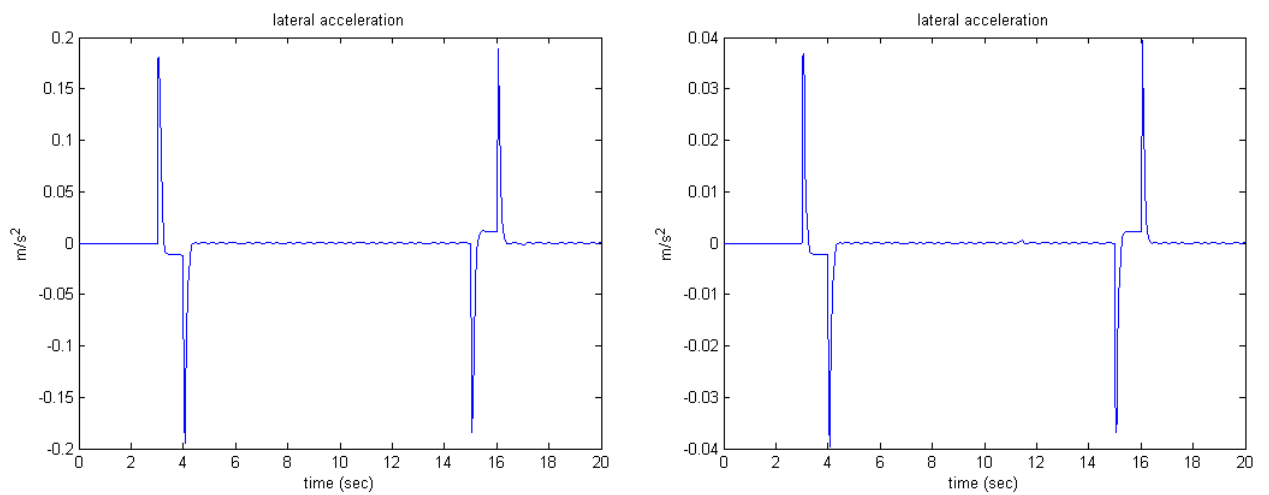
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



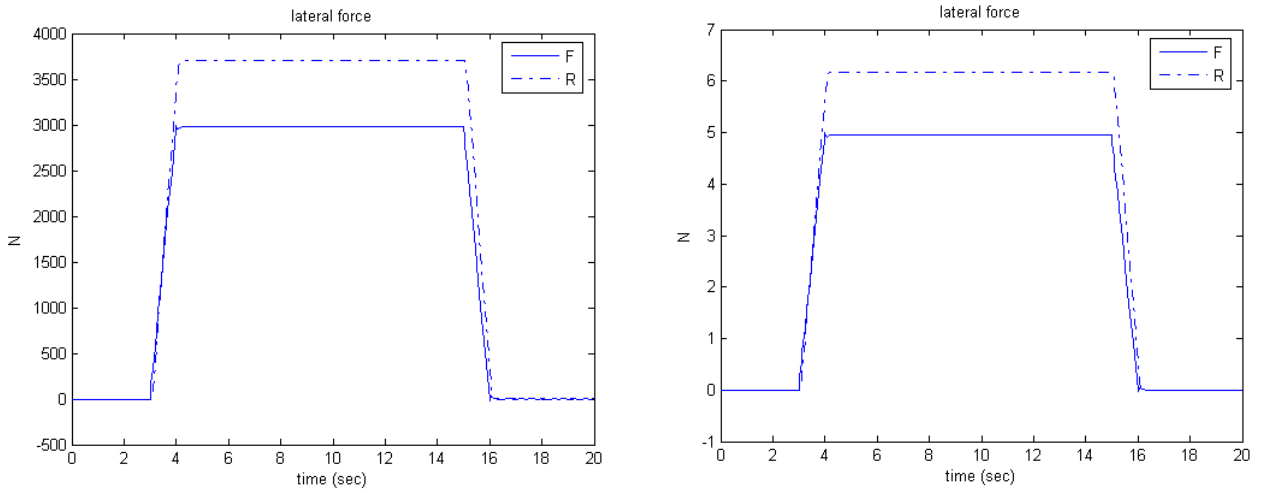
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา)



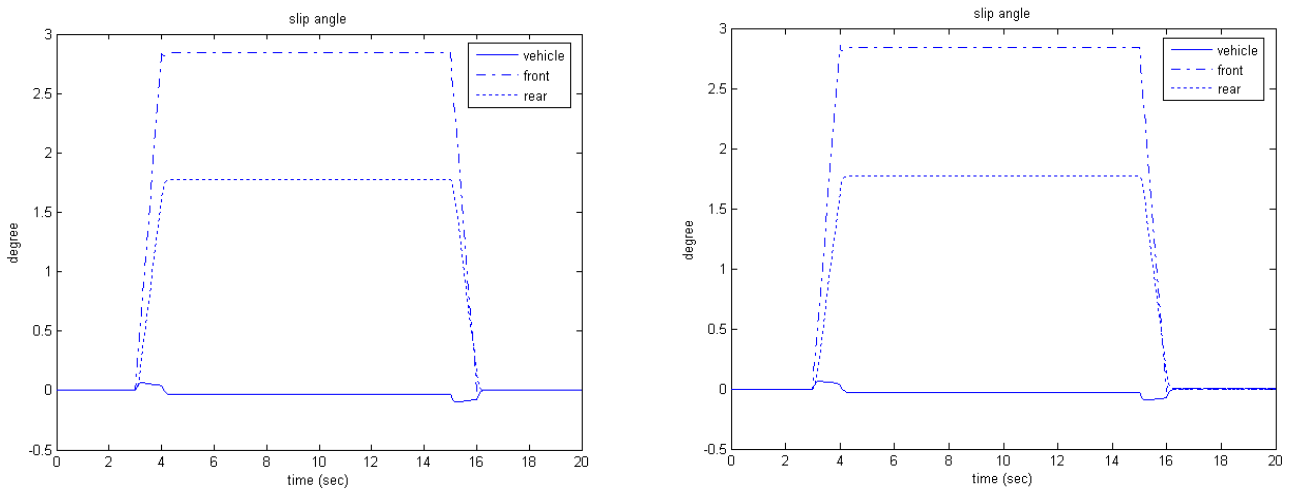
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้างระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อยส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงด้านข้างระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบมุมลื่นไถลระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)

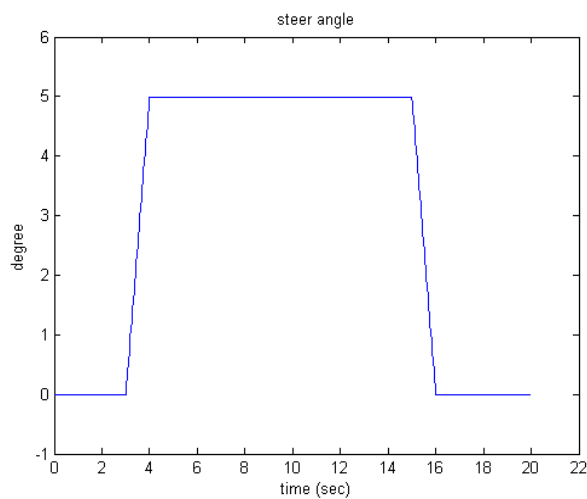
จากนั้นจึงได้ทำการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Simulink ของ MATLAB เพื่อเปรียบเทียบพลศาสตร์ยานยนต์ระหว่างยานยนต์ต้นแบบ (Prototype) กับยานยนต์ย่อส่วน (Scale) โดยได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ของยานยนต์ ดังนี้

ตารางที่ 3.2 Parameter ของรถสำหรับการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ

parameter	Prototype	Model (scale 1:5)
a	1.25	0.25
b	1	0.2
L	2.25	0.45

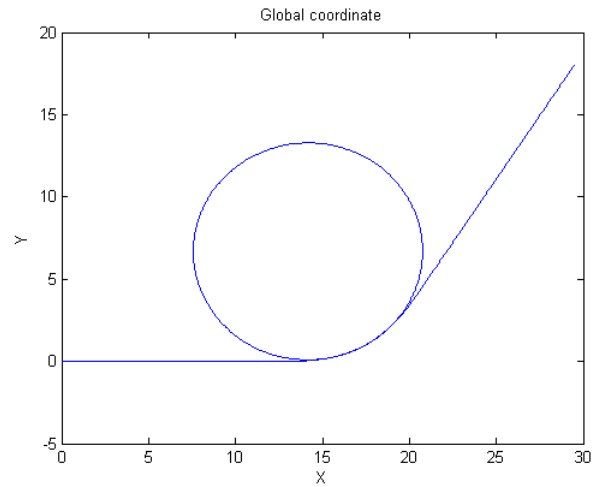
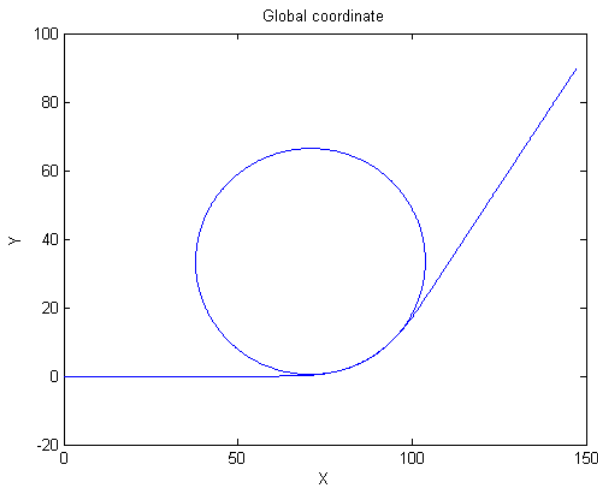
M	1100	8.8
Mw	40	0.32
W	1.5	0.3
c	0.42	0.084
parameter	Prototype	Model (scale 1:5)
lz	1100	0.352
ly	1600	0.512
lx	590	0.188
Cf	60,000	100
Cr	120,000	200
Kt	20,000	160
Ksf	20,000	160
Ksr	20,000	160
Csf	10,000	80
Csr	10,000	80
V	20	4

โดยมีมุมพวงมาลัย ดังรูป

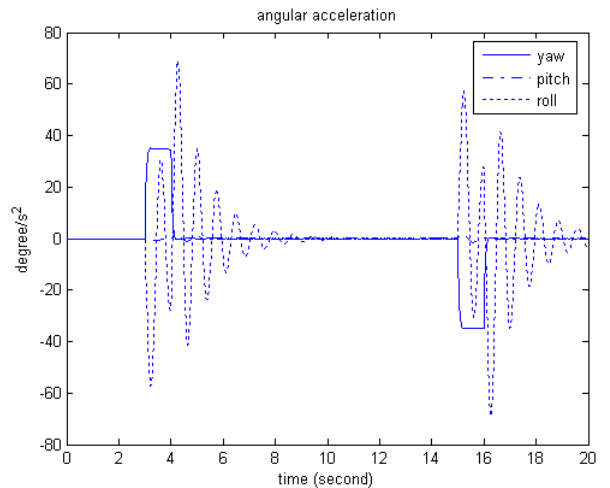
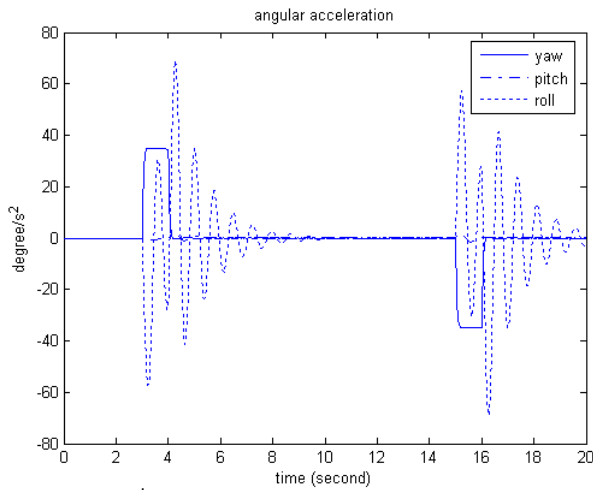


รูปที่ 3.8 มุมพวงมาลัย (Steer angle)

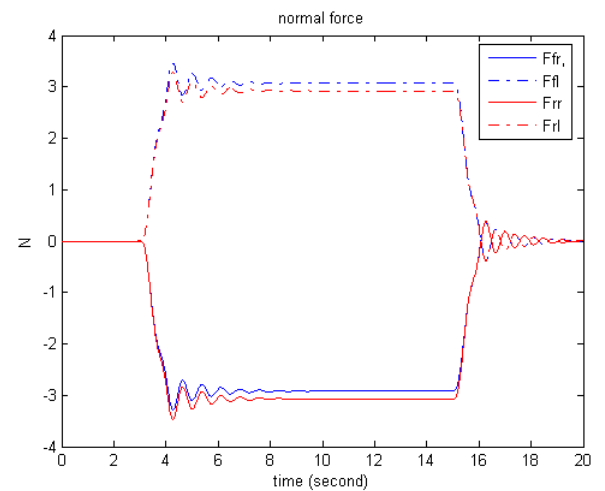
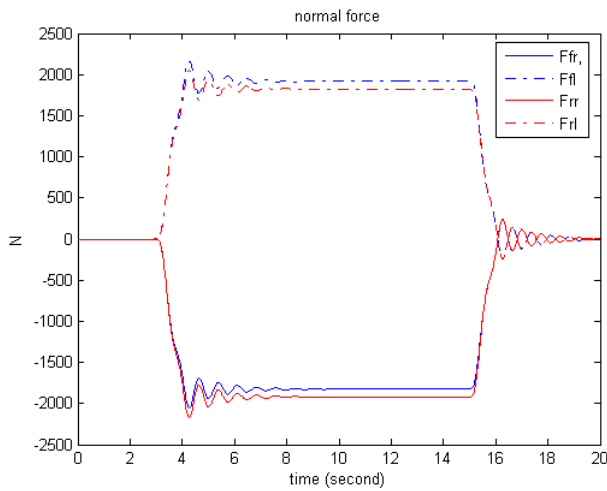
ผลลัพธ์การตอบสนองของยานยนต์ต้นแบบกับยานยนต์ย่อยส่วนที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์
ด้วยโปรแกรม Matlab มีดังนี้



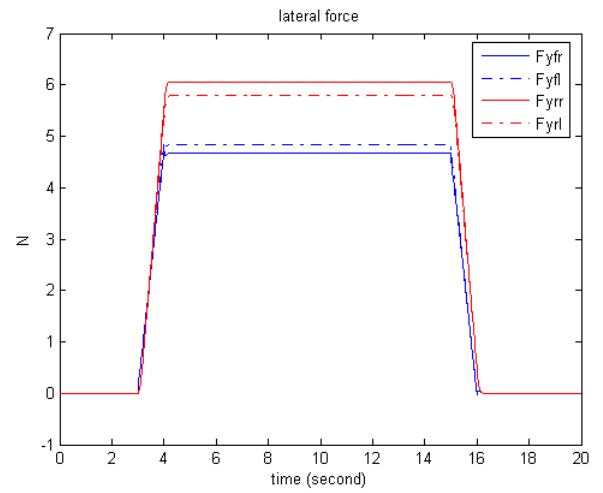
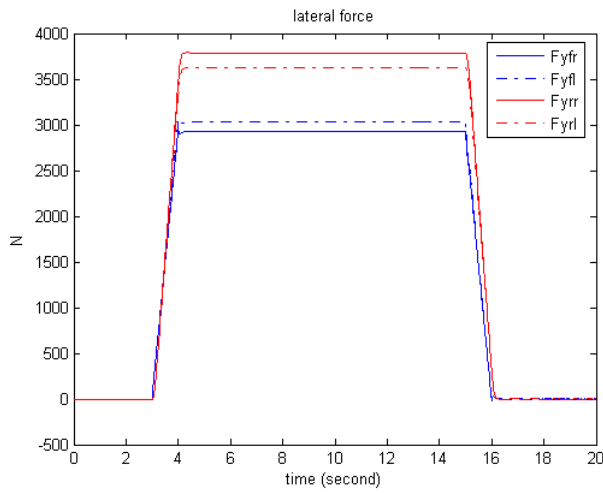
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



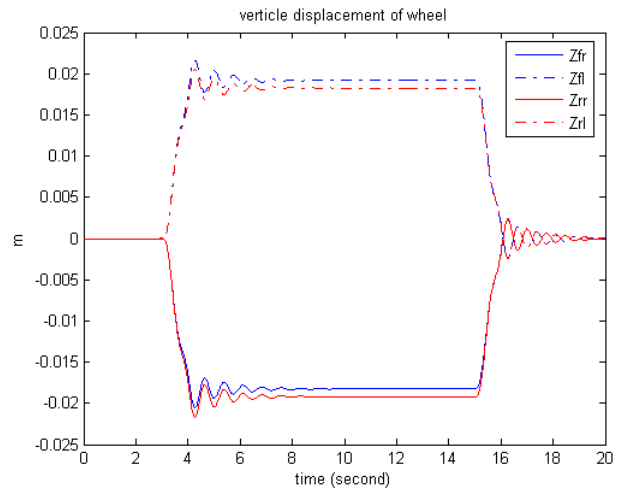
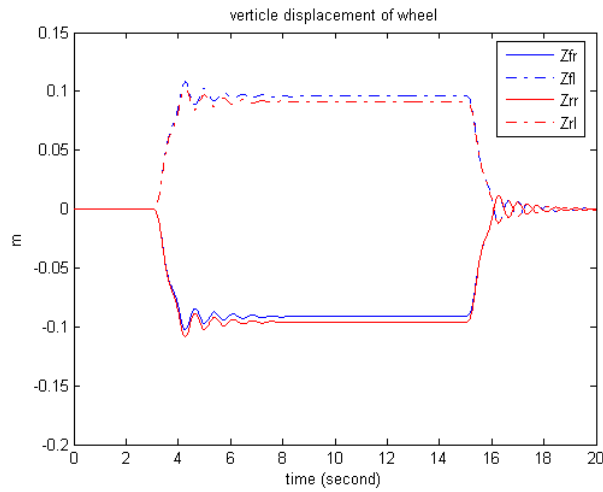
รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



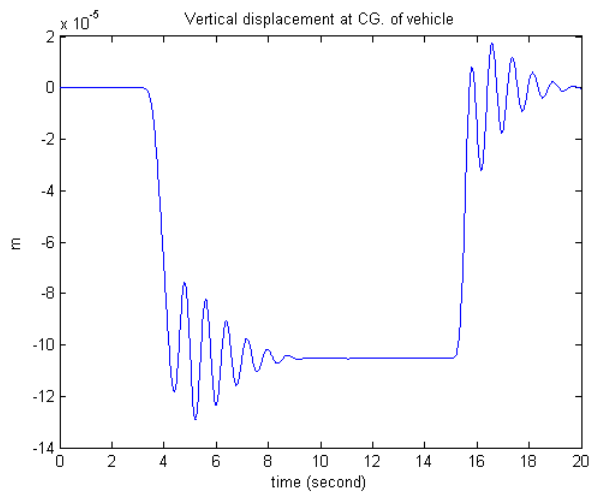
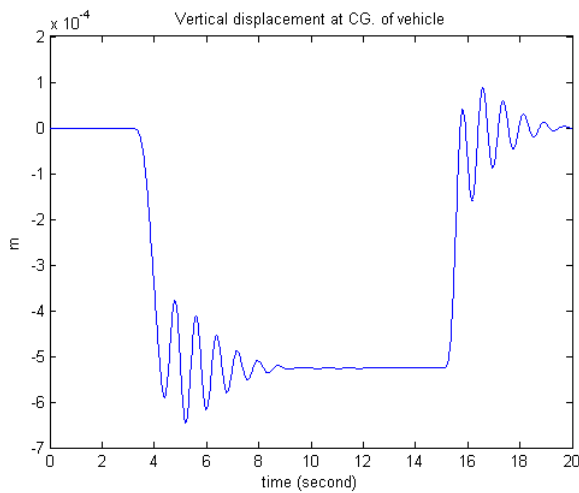
รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบแรงตั้งฉากระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



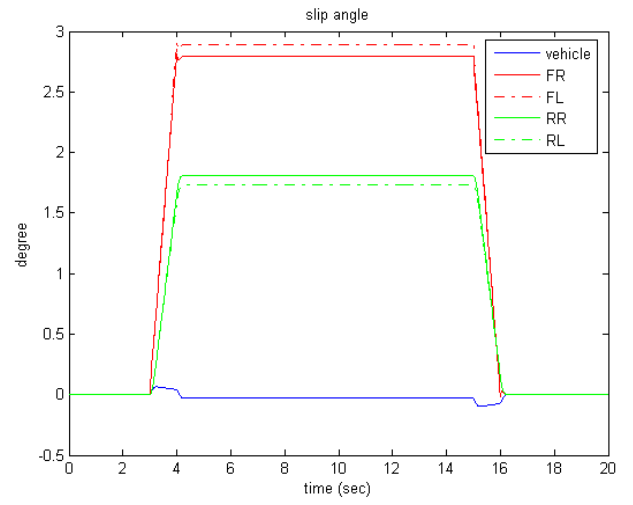
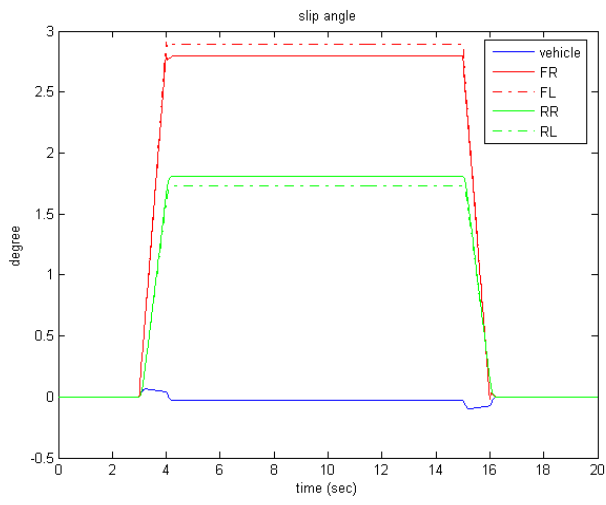
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบแรงด้านข้างที่ล้อระหว่างยานยนต์จริง (ซ้าย) กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งของล้อระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แนวตั้งที่จุดศูนย์กลางระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)



รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบมุมดิ่งไถลที่ล้อระหว่างยานยนต์จริง(ซ้าย)กับยานยนต์ย่อส่วน (ขวา)

บทที่ 4

ปัจจัยและระบบการรับรู้ของมนุษย์

4.1 บทนำ

การสร้างเครื่องจำลองเสมือนจริง มีจุดประสงค์เพื่อจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะจริงๆ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ซึ่งมีพื้นที่ทำงาน (workspace) ที่จำกัด โดยในการใช้งานนั้นสามารถนำไปใช้ในการฝึกทักษะการควบคุมเพื่อให้มีประสิทธิภาพ และเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ สิ่งที่สำคัญในการสร้างเครื่องจำลองเสมือนจริงคือความสามารถในการทำให้ผู้ควบคุมที่กำลังควบคุมอยู่ในเครื่องจำลองเสมือนจริงนั้นรู้สึกเสมือนกับว่าตนเองกำลังควบคุมยานพาหนะนั้นจริงๆ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์เพื่อนำปัจจัยที่ได้จากการศึกษามาใช้ในการสร้างระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงให้สามารถถ่ายทอดให้ผู้ควบคุมเกิดความรู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด โดยระบบที่มีส่วนเกี่ยวข้องจะมี 2 ระบบใหญ่ๆ ด้วยกันอันได้แก่ระบบประสาท เปรียบเสมือนกับส่วนประมวลผลโดยมีส่วนเกี่ยวข้องคือมีหน้าที่รับความรู้สึกต่างๆจากเซลล์ซึ่งอยู่ตามตำแหน่งต่างๆทั่วร่างกายเพื่อนำมาให้สมองวิเคราะห์ และแปลความหมายของความรู้สึกที่ได้รับมา จึงจะทำให้มนุษย์รู้ว่ามีสภาวะนั้นได้เกิดอะไรขึ้น และอีกระบบคือระบบการทรงตัวโดยระบบนี้จะมีหน้าที่ในการบอกถึงความสามารถในการทรงตัวของมนุษย์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง และทิศทางของร่างกาย โดยรับข้อมูลมาจากการมองเห็นด้วยสายตา การสัมผัสถึงการเคลื่อนไหวและแรงต่างๆจากผิวหนัง และข้อต่อต่างๆทั่วร่างกาย รวมถึงการรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นด้วยระบบของหูชั้นใน เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมารวมกันจึงทำให้มนุษย์สามารถทราบถึงสภาวะที่เป็นอยู่ ณ ขณะนั้นได้ ซึ่งระบบการทรงตัวนี้เปรียบเสมือนอุปกรณ์ตรวจวัดการรับรู้ (sensor) คอยส่งข้อมูลไปให้ระบบประสาทส่วนกลางเพื่อประมวลผลในขั้นต่อไป

4.2 ระบบประสาท

ระบบประสาทเป็นระบบที่ควบคุมการทำงานที่ของอวัยวะต่างๆ ของทุกระบบในร่างกายให้ทำงานประสานกัน เพื่อให้ร่างกายสามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมภายในและภายนอก ร่างกายให้บุคคลมีพฤติกรรมและดำรงชีวิตอยู่ได้ตามปกติ นอกจากนี้ระบบประสาทยังเป็นแหล่งที่มาของความคิดความจำ ความรู้สึก สติปัญญา ความฉลาด ไหวพริบ ปฏิภาณ การตัดสินใจ การใช้เหตุผล การแสดง อารมณ์และการสื่อสารต่างๆ

4.2.1 โครงสร้างของระบบประสาท

ระบบประสาทในร่างกายมนุษย์ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

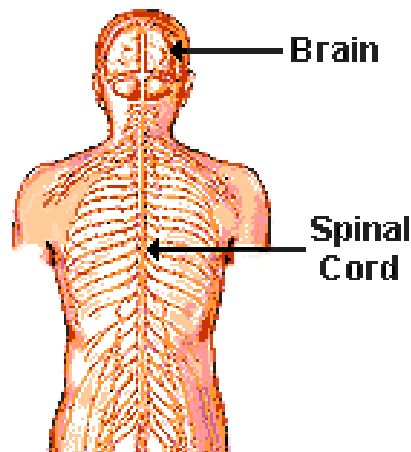
1. ระบบประสาทส่วนกลาง (*Central nervous system*) ประกอบด้วยสมอง (Brain) และไขสันหลัง (Spinal cord) โดยระบบประสาทส่วนกลางจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการจำลองสถานะเสมือนจริง คือทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับมาจากระบบการทรงตัว

2. ระบบประสาทส่วนปลาย (*Peripheral nervous system*) ประกอบด้วยเส้นประสาทสมอง (Cranial nerve) ที่ออกจากส่วนต่างๆ ของสมอง และเส้นประสาทไขสันหลัง (Spinal nerve)

3. ระบบประสาทอัตโนมัติ (*Autonomic nervous system*) เป็นระบบประสาทที่ควบคุมการทำงานของอวัยวะภายในต่างๆ ซึ่งการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติอยู่นอกเหนือการบังคับของจิตใจ

4.2.2 ระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system)

ระบบประสาทส่วนกลางประกอบด้วยสมอง (Brain) ซึ่งอยู่ภายในโพรงกะโหลกศีรษะ และไขสันหลัง ซึ่งอยู่ภายในช่องกระดูกสันหลัง



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบประสาทส่วนกลาง [5]

สมองใหญ่ หรือ เซเรบรัม (Cerebrum)

สมองใหญ่เป็นส่วนของสมองที่เจริญมากที่สุดแบ่งเป็น 2 ซีก ซ้ายและขวา สมองใหญ่ประกอบไปด้วยเซลล์ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่สำคัญ โดยจะจำแนกตามบริเวณ ดังนี้

1. Motor area ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อที่ละเอียดอ่อน ได้แก่ การทำงานของนิ้วมือ การพูด การรับประทานอาหาร เป็นต้น

2. Somesthetic sensory area แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

- พื้นที่ส่วนหลัก (Primary area) ทำหน้าที่รับสัญญาณเกี่ยวกับความรู้สึกโดยตรงจากตัวรับความรู้สึกทั่วร่างกาย เช่น สัมผัส แรงกด อุณหภูมิ และความเจ็บปวด
- พื้นที่ส่วนรอง (Secondary area) ทำหน้าที่แปลสัญญาณความรู้สึกนั้นว่า มือกำลังสัมผัสกับโต๊ะ แก้วหรือลูกบอล

3. Visual area แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- พื้นที่ส่วนหลัก (Primary area) ทำหน้าที่รับแสงสว่างรับภาพที่เห็น เข้าสู่ลานสายตา
- พื้นที่ส่วนรอง (Secondary area) ทำหน้าที่แปลความหมายของภาพที่รับนั้น

4. Auditory area แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- พื้นที่ส่วนหลัก (Primary area) ทำหน้าที่รับความดัง และความถี่และคุณภาพของเสียง
- พื้นที่ส่วนรอง (Secondary area) ทำหน้าที่แปลความหมายของเสียงที่ได้ยิน

5. Wernicke's area ทำหน้าที่แปลความจากการอ่าน การได้ยิน การรู้สึก ไปเป็นการรับรู้ในคนที่มีส่วนนี้ไม่เจริญจึงไม่สามารถคิดหรือพิจารณาด้วยเหตุผล (Thinking ability) ได้

6. Short-term memory area of the temporal lobe มีความสำคัญในการจำในระยะสั้น เช่น เป็นนาฬิกา หรือเป็นสัปดาห์

7. Prefrontal area หน้าที่ของส่วนนี้ยังไม่ค่อยชัดเจนนัก แต่มีความสำคัญต่อการพัฒนาความนึกคิดสำหรับในคนที่ไม่มีสมองส่วนนี้พบว่าจะไม่มีสมาธิต่อการทำงานที่ใช้เวลานานและไม่สามารถวางแผนอนาคตหรือแก้ปัญหาที่ยาก

4.3 ระบบการทรงตัว (Equilibrium system)

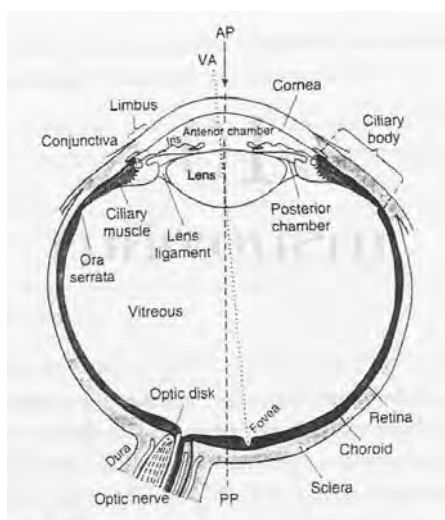
ระบบการทรงตัว คือระบบที่ทำให้มนุษย์รับรู้เกี่ยวกับความเสถียรภาพ สภาวะแวดล้อม และแรงที่เกิดขึ้นกับร่างกายในท่าทางต่างๆ ระบบการทรงตัวของร่างกายมนุษย์สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ระบบ [6] คือ ระบบตา(Vision) ระบบการรับความรู้สึกจากกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception) และระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular) โดยระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular) มีหน้าที่ประสานงานการเคลื่อนไหวของศีรษะและตา โดยมีการติดต่อกับระบบประสาทส่วนกลาง ยกตัวอย่างเช่น การจำลองการขับรถยนต์ ในขณะที่ผู้ควบคุมบังคับรถด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ในขณะที่นั้นผู้ควบคุมสามารถรับรู้ถึงการสัมผัสและการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ (Proprioception) โดยผู้ควบคุมรู้สึกถึงการผลัดจากทางด้านหน้าทำให้บริเวณแผ่นหลังของผู้ควบคุมสัมผัสกับเบาะที่นั่งมากขึ้น และรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากระบบของหูชั้นใน (Vestibular) รวมถึงไปผู้ควบคุมสามารถมองเห็น (Vision) สิ่งแวดล้อมภายนอกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

4.3.1 ระบบตา

การมองเห็นจัดอยู่ในระบบประสาทรับความรู้สึกพิเศษ ทำให้มนุษย์และสัตว์สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงรอบๆตัวเราจากการกระตุ้นผ่านทางระบบตา ถ้าเปรียบเทียบความสำคัญของระบบประสาทรับความรู้สึกทั้งหมด การมองเห็นเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการดำรงชีวิต

สรีระกายวิภาคของตา

ลักษณะทั่วไป ตามีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ข้างในกลวง ฝังอยู่ในเบ้าตา ดังรูปที่ 4.2



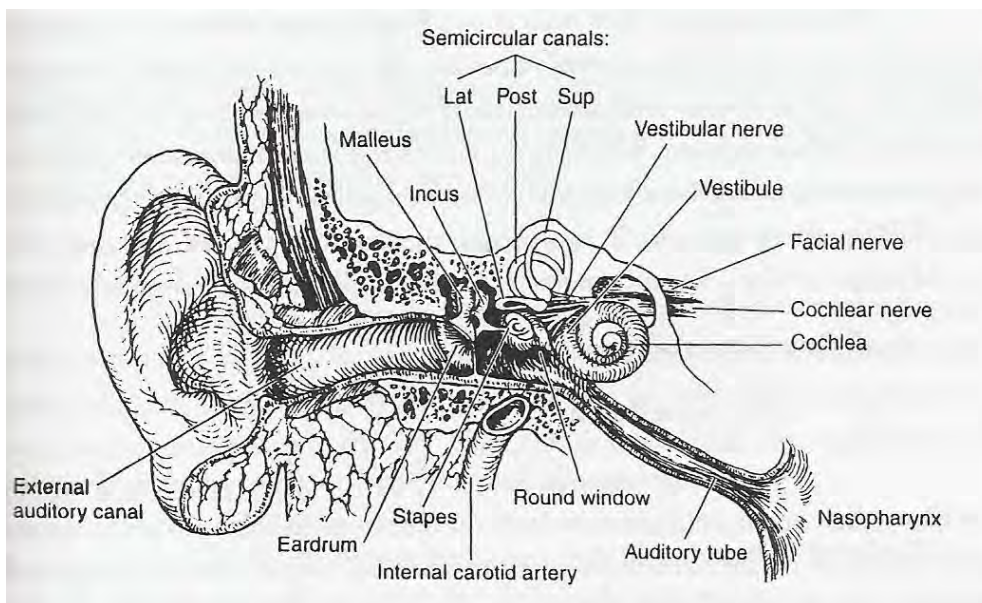
รูปที่ 4.2 สรีระกายวิภาคของตา [6]

การมองเห็นเกิดจากการทำงานของตัวรับแสง (Photoreceptor) ในจอตาส่งข้อมูลผ่านทางวิถีประสาทรับภาพจนถึงซีรีบรัลคอร์เท็กซ์ บริเวณที่รับภาพและแปลภาพเรียกว่าวิซวลคอร์เท็กซ์ (Visual cortex) โดยแสงที่มาโฟกัสที่จอตานี้ เปรียบเสมือนจากรับภาพจะถูกดูดซับโดยสารสีในตัวรับแสง เซลล์รีด (rod) เป็นตัวรับสำหรับการมองเห็นในที่มืด เซลล์โคน (Cone) สำหรับการมองเห็นสีและการเห็นในที่แจ้ง

ความถี่ของการฉายแสงอย่างรวดเร็วเข้ามาที่ตาติดต่อกันจนกระทั่งทำให้รู้สึกเหมือนกับการเห็นแสงเข้ามาต่อเนื่อง ได้ถูกนำไปใช้ในการฉายภาพยนตร์หรือโทรทัศน์ ในกรณีของภาพยนตร์ภาพจะถูกฉายเข้าสู่จอด้วยความเร็ว 24 ภาพต่อวินาที แต่ถ้าเป็นโทรทัศน์ภาพจะถูกฉายเข้ามาด้วยความเร็ว 60 ภาพต่อวินาที เป็นผลทำให้ภาพที่รวมเข้าด้วยกันเห็นเป็นการเคลื่อนไหวที่ต่อเนื่อง

4.3.2 ระบบการรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular)

หูแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ หูชั้นนอก หูชั้นกลาง หูชั้นใน



รูปที่ 4.3 สรีระกายวิภาคของหู [6]

หูชั้นนอก

ประกอบด้วยใบหู ช่องหูชั้นนอก (External auditory meatus) และเยื่อแก้วหู (tympanum หรือ ear-drum) โดยใบหูจะประกอบไปด้วยกระดูกอ่อนและผิวหนัง ในสัตว์บางชนิดมีกล้ามเนื้อที่ทำให้ใบหูตั้งขึ้นมาได้ เพื่อช่วยให้ฟังเสียงได้ชัดเจนขึ้น

หูชั้นกลาง

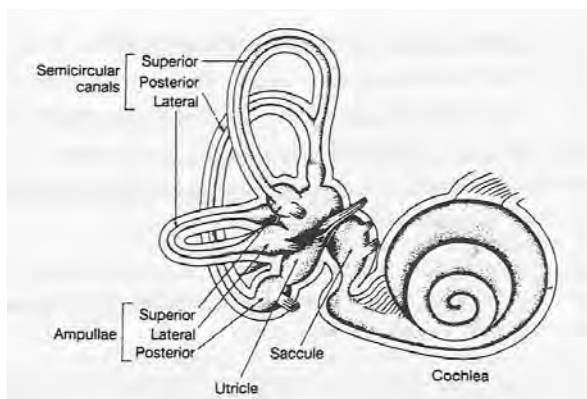
แยกจากหูชั้นนอกโดยเยื่อแก้วหู ช่องว่างในหูชั้นกลางเต็มไปด้วยอากาศ ในหูชั้นกลางมีกระดูกเล็ก 3 ชิ้น ประกอบด้วยกระดูกค้อน (malleus) กระดูกทั่ง (incus) และกระดูกโกลน (stapes) จะช่วยในการนำพลังงานผ่านอากาศไปจนถึงหูชั้นใน

โดยในขณะที่เสียงเดินทางผ่านหูชั้นกลางนั้น หูชั้นกลางจะเปลี่ยนพลังงานจากอากาศให้กลายเป็นการสั่นสะเทือนของของเหลวในหูชั้นใน ซึ่งหูชั้นกลางจะทำหน้าที่ขยายการสั่นสะเทือนของคลื่นที่เข้ามา

หูชั้นใน (labyrinth)

ภายในหูชั้นในนี้จะมี vestibular โดยเราสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ เซมิเซอร์คิวลาร์คาแนล (Semicircular canal, SCC) และอโธลิท (Otolith) โดยอโธลิท (Otolith) นี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือยูทริเคิล (Utricule) และแซคคูล (Saccule) ดังรูปที่ 4.4 แอมพิวลา

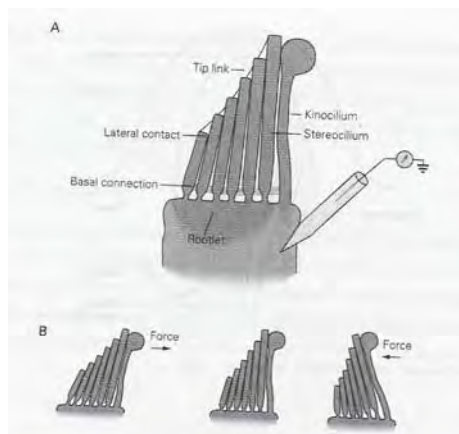
(Ampulla) ของเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal, SCC) ประกอบด้วยตัวรับความรู้สึกซึ่งตอบสนองต่อเมื่อมีการหมุนของศีรษะ โดยออตolith จะมีความไวต่อทิศทางแรงดึงดูดของโลก และไวต่อความเร่งเชิงเส้นของศีรษะ เนื้อเยื่อทั้งหมดนี้ประกอบกันเป็น เมมเบรน (Membrane) ซึ่งเป็นระบบท่อที่บรรจุเอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ซึ่งมีส่วนประกอบคล้ายของเหลวภายในเซลล์ และล้อมรอบด้วยเพอริลิมฟ์ (Perilymph) ซึ่งมีส่วนประกอบคล้ายของเหลวภายนอกเซลล์



รูปที่ 4.4 เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal), ยูทริเคิล (Utricle), แซคคูล (Saccule), [6]

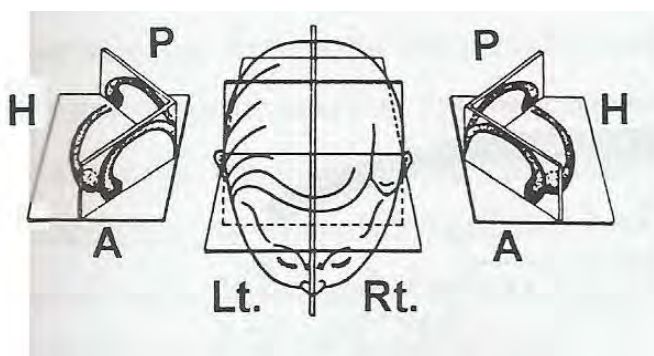
การทำงานของระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular)

การรับรู้ความรู้สึกของระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular) เกิดจากการกระตุ้นแฮร์ เซลล์ (Hair cell) ในแอมพิวลา (Ampulla) และออตolith เซลล์บนแต่ละเซลล์ ประกอบด้วย สเตริโอไซเลีย (Stereocilia) ประมาณ 40-70 อัน ยื่นออกมาจากผิวนอกเซลล์ เซลล์เหล่านี้จะอยู่รวมกันเป็นรูปหกเหลี่ยมและสูงขึ้นไปเรื่อยๆ ทางด้านหนึ่งซึ่งมีคิโนซิเลียม (Kinocilium) โดย คิโนซิเลียม (Kinocilium) จะเป็นขนยาวที่มีลักษณะต่างกับสเตริโอไซเลียม (Stereocilia) รูปที่ 4.5 ถ้า สเตริโอไซเลียม (Stereocilia) งอไปทางด้านคิโนซิเลียม (Kinocilium) จะเกิดดีโพลาไรเซชัน (Depolarization) และถ้าเคลื่อนที่ไปอีกทางจะเกิดไฮเปอร์โพลาไรเซชัน (Hyperpolarization) โดยขณะที่เกิดปฏิกิริยาโพลาไรเซชันเซลล์จะหลั่งสารสื่อประสาททำให้มีการเพิ่มอัตราการนำกระแสประสาทของประสาทนำเข้าที่มาเลี้ยงเซลล์ ในขณะที่การเกิดไฮเปอร์โพลาไรเซชัน (Hyperpolarization) จะลดอัตราการนำกระแสประสาท



รูปที่ 4.5 คิโนซีเลียม (Kinocilium), สเตริโอซีเลลาร์ (Stereocilia) [6]

เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) มี 3 คู่ ได้แก่ ตำแหน่งด้านข้าง (Lateral) หรือ ตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) , ตำแหน่งด้านหน้า (Anterior) และตำแหน่งด้านหลัง (Posterior) โดยทั้งสามจะทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน ถ้าก้มหน้าลง 30 องศา จะทำให้เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ในตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) ขนานกับพื้นโลก และเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ในตำแหน่งด้านหน้า (Anterior) ทำมุม 45 องศา ไปด้านหลังและด้านข้าง ดังรูป



รูปที่ 4.6 แสดงระนาบของเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) [7]

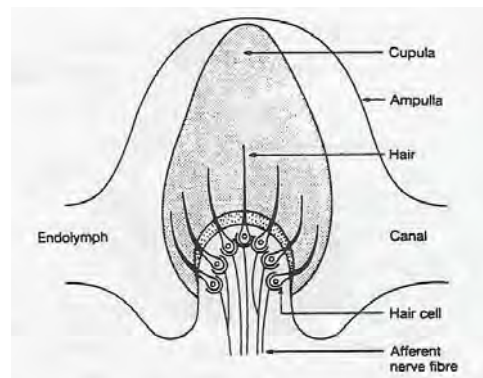
A = ด้านหน้า (Anterior)

H = แนวนอน (Horizontal)

P = ด้านหลัง (Posterior)

การทำงานของเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) จะทำงานเป็นคู่ โดยตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) ข้างซ้ายทำงานคู่กับตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) ทางข้างขวา, ตำแหน่งด้านหน้า (Anterior) ของหูข้างหนึ่งทำงานคู่กับตำแหน่งด้านหลัง (Posterior) ของหูอีกข้างหนึ่ง ถ้าเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ข้างหนึ่งถูกกระตุ้น เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) อีกด้านหนึ่งที่คู่กันจะถูกยับยั้ง เนื่องจากมนุษย์เคลื่อนไหวในสามมิติ สมอจึงรับรู้การเคลื่อนไหวของศีรษะโดยการแปลผลรวมกระแสประสาททั้งหมดจาก เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ทั้งสามคู่พร้อมกัน

ภายในระบบท่อของหูชั้นในจะบรรจุเต็มไปด้วยเอนโดลิมฟ์ (Endolymph) และด้านปลายสุดของแต่ละเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) จะมีแอมพิวลา (Ampulla) ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยตัวรับที่เรียกว่า คริสต้า แอมพิวลาริส (Crista ampullaris) ประกอบด้วยคิวพูลา (Cupula) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นไดอะแฟรม (Diaphragm) และตอบสนองต่อการไหลของเอนโดลิมฟ์ (Endolymph)

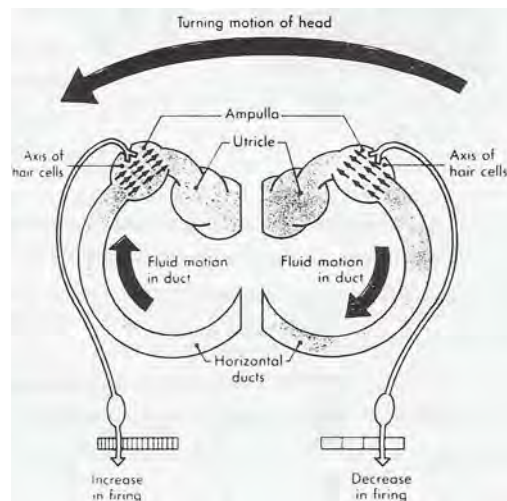


รูปที่ 4.7 คริสต้า แอมพิวลาริส (Crista ampullaris) [6]

เราสามารถทดสอบการทำงานของเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ได้โดยการให้ผู้ถูกทดสอบนั่งอยู่บนเก้าอี้ซึ่งหมุนได้ในแนวระนาบ และมีเข็มขัดนิรภัย จากนั้นให้ก้มหน้า 30 องศาขณะที่มนุษย์นั่งพักอยู่นั้นแฮร์เซลล์ (Hair cell) ซึ่งอยู่ในคริสต้า แอมพิวลาริส (Crista ampullaris) ของหูชั้นในส่งกระแสประสาทด้วยความถี่ประมาณ 10-20 Hz ทั้งสองข้าง เมื่อเริ่มต้นหมุนศีรษะไปทางซ้าย (ทวนเข็มนาฬิกา) กะโหลกศีรษะและ hair cell จะหมุนตาม แต่เนื่องจากแรงเฉื่อย (inertia) ของเอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ทำให้ เอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของกะโหลกศีรษะ นั่นคือ ที่หูซ้าย เอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ไหลจากเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ในตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) เข้าสู่ยูทริเคิล (Utricule) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8 ทำให้สเตริโอซิลเลีย (Stereocilia) เอน

เข้าหาคิโนซีเลียม (Kinocilium) เกิดกระบวนการดีโพลาไรเซชัน (Depolarization) ขึ้น ความถี่ของกระแสประสาทในหูข้างซ้ายสูงขึ้น ในขณะที่เอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ในหูขวาไหลจากยูทริเคิล (Utricle) เข้าสู่เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) ในตำแหน่งแนวนอน (Horizontal) ทำให้สเตริโอซีเลีย (Stereocilia) เบนออกจาก คิโนซีเลียม (Kinocilium) เกิดกระบวนการไฮเปอร์โพลาไรเซชัน (Hyperpolarization) ขึ้น และความถี่ของกระแสประสาทของหูข้างขวาลดลง สมอจะแปลความหมายว่า ศีรษะกำลังหมุนไปทางด้านซ้าย ถ้าหมุนศีรษะไปทางซ้ายต่อเนื่องจนมีความเร็วคงที่ เอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ภายใน เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) จะไหลในทิศทางเดียวกันกับการหมุนของกะโหลกศีรษะ สมอจะแปลว่า หมุนไปทางซ้ายข้างล่าง จนกระทั่งเอนโดลิมฟ์ (Endolymph) และกะโหลกศีรษะหมุนไปในทิศเดียวกัน และมีความเร็วที่เท่ากัน สมอจะแปลว่าหยุดหมุนทุกอย่างที่ศีรษะกำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วคงที่ ขณะนี้กระแสประสาทจากหูทั้งสองข้างเท่ากัน และเท่ากับขณะที่ยังไม่มี การหมุนศีรษะ

เมื่อหยุดหมุนเก้าอี้ กะโหลกศีรษะจะหยุดหมุนทันที แต่เอนโดลิมฟ์ (Endolymph) ยังคงหมุนไปทางซ้ายด้วยแรงเฉื่อย ทำให้เกิดการกระตุ้นของหูทางด้านขวา และยับยั้งการทำงานของหูข้างซ้าย สมอจะแปลว่ากำลังหมุนไปทางขวา ทั้งๆที่กำลังนั่งนิ่งๆ อยู่บนเก้าอี้

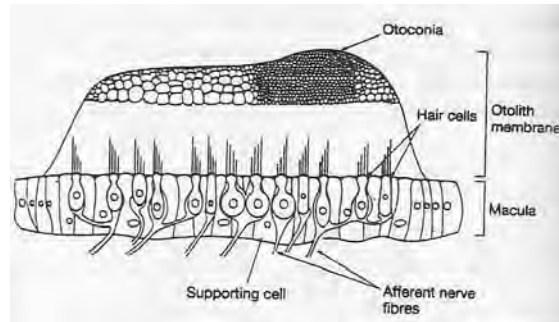


รูปที่ 4.8 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเอนโดลิมฟ์ (Endolymph) [6]

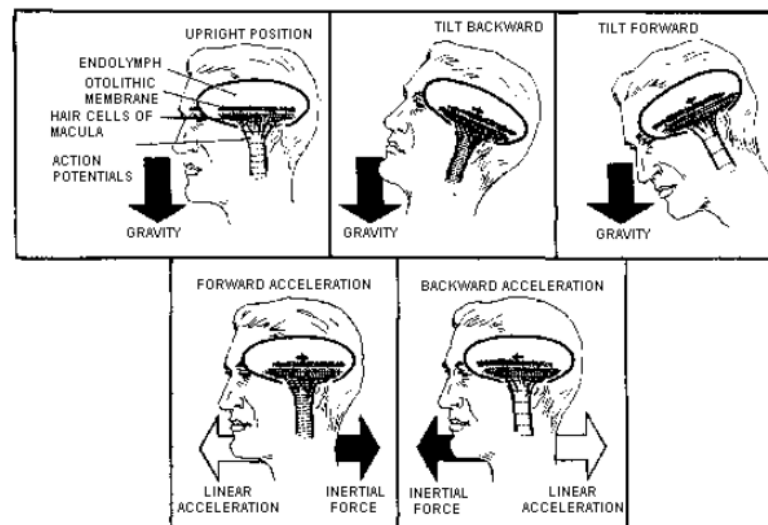
ยูทริเคิล (Utricle) และแซคคูล (Saccule)

ยูทริเคิล (Utricle) และแซคคูล (Saccule) มีโครงสร้างเรียกว่ามาคิวลา (Macula) ซึ่งเป็นบริเวณที่หนา ประกอบด้วยแฮร์เซลล์ (Hair cell) และออตolith เมมเบรน (Otolith membrane) ซึ่งประกอบด้วยผลึกของหินปูนที่เรียกว่าออตโคโนเนีย (Otoconia) มีความ

ถ่วงจำเพาะประมาณ 2.9 ซึ่งสูงกว่าของเอนโดลิมป์ (Endolymph) ถ้าศีรษะอยู่นิ่งๆ ออโทลิท (Otolith) จะตกลงมาต่ำสุด ทำให้เกิดความรู้สึกถึงทิศทางของแรงโน้มถ่วง แฮร์เซลล์ (Hair cell) ใน มาคิวลา (Macula) จะตอบสนองต่อความเร่งเชิงเส้น อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือด้านหลัง เคลื่อนที่ขึ้นหรือลง เราสามารถจำลองการขับรรถณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร่งได้ โดยการเอียงศีรษะไปด้านหลังซึ่งจะทำให้เราสามารถรับรู้ความเร่งจากยูทริเคิล (Utricle) และจากแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นระหว่างแผ่นหลังกับเบาะนั่ง



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของมาคิวลา (Macula) [1]



รูปที่ 4.10 การรับรู้ถึงความเร่งเชิงเส้นของออโทลิท (Otolith) [8]

ออโทลิท (Otolith) ไม่สามารถที่จะแยกแยะระหว่างความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง หรือความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปจะเรียกปัญหานี้ว่ากราวิโต อินเนอร์เชียลฟอร์ซ (Gravito-inertial force, GIF)

เนื่องจากออตolith (Otolith) ไม่สามารถที่จะแยกการรับรู้ระหว่างความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง กับความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ ทำให้ออตolith (Otolith) วัดค่าความเร่งเป็นผลรวมของความเร่งทั้งสอง

$$\underline{f} = \underline{a} + \underline{g} \quad (4.1)$$

ในกรณีที่

\underline{f}	หมายถึง ผลรวมของความเร่งเชิงเส้นที่ออตolith (Otolith) สามารถวัดได้
\underline{a}	หมายถึง ความเร่งเชิงเส้น
\underline{g}	หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

ออตolith (Otolith) ไม่สามารถแยกแยะความเร่งที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วง หรือความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า ออตolith (Otolith) จะส่งสัญญาณของผลรวมของความเร่งระหว่างความเร่งที่เกิดจากความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงกับความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไปที่ระบบประสาทส่วนกลาง โดยระบบประสาทส่วนกลางจะต้องสามารถแยกแยะสัญญาณที่ได้รับมา โดยอาศัยข้อมูลจากส่วนอื่นช่วยในการวิเคราะห์ จึงจะทำให้สมองสามารถแยกได้ว่าสัญญาณความเร่งที่ได้รับจาก ออตolith (Otolith) นั้นเกิดขึ้นจากการเอียงตัวหรือว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาถึง ผลรวมของสัญญาณการรับรู้ (multisensory integration) จะเห็นได้ว่าสมองจะต้องรวบรวมข้อมูลจากสัญญาณการรับรู้ที่ตำแหน่งต่างๆ เช่น การรับรู้ของ เซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) เมื่อเกิดการหมุน การรับรู้ของ ออตolith (Otolith) เมื่อเกิดความเร่งจากการเคลื่อนที่หรือการเอียงตัว โดยในการแยกช่วงความถี่ของสัญญาณความเร่งที่ได้รับมาจาก ออตolith (Otolith) ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะบอกถึงความเร่งที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่หรือจากแรงโน้มถ่วง ถ้ากรณีความถี่ที่ได้รับเป็นความถี่สูงหมายความว่าเกิดการเคลื่อนที่ แต่ถ้าความถี่ที่ได้รับเป็นความถี่ต่ำแสดงว่าเกิดจากการเอียงตัว

4.3.3 ระบบการรับรู้ของเส้นประสาทและกล้ามเนื้อ

การรับรู้ของระบบนี้ ทำหน้าที่เหมือนตัวตรวจจับอุณหภูมิ ตรวจจับความดัน และตรวจจับขนาดแรง แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนการรับรู้ความรู้สึกประเภทการสัมผัส ความดัน และการสั่น (discriminative touch) เป็นส่วนรับรู้ข้อมูลที่มีความถี่สูง ซึ่งตัววัดจะเป็นเส้นประสาทใต้ผิวหนัง
2. ส่วนรับรู้ข้อมูลเกี่ยวกับความเจ็บปวด กับอุณหภูมิ (pain and temperature)

3. ส่วนรับรู้ที่เกี่ยวข้องกับกล้ามเนื้อ (proprioception) เช่น ความรู้สึกยืดหยุ่นของ กล้ามเนื้อ ตำแหน่งข้อต่อ ทำหน้าที่เหมือนพวกอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดแรงที่ร่างกายโดนกระทำ

4.3.3.1 ตัวรับสัมผัส

การสัมผัสจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของผิวหนังไปบนวัตถุซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถของเราในการรับรู้หรือแยกความแตกต่างของผิวของวัตถุ ขนาด รูปร่าง และเนื้อของวัตถุ ตัวรับสัมผัสสามารถปรับตัวได้เร็ว พบมากอยู่ตามผิวหนัง โดยเฉพาะที่นิ้วมือ และริมฝีปาก แต่ตามลำตัวมีน้อย ที่ผิวหนังมีตัวรับอย่างน้อย 6 ชนิด

1.Free nerve ending พบในผิวหนังทั่วไป และพบในเนื้อเยื่อหลายแห่ง สามารถรับสัมผัส และแรงกดได้ นอกจากนี้ยังรับความรู้สึกเจ็บปวด และอุณหภูมิด้วย

2.Meissner's corpuscle มีรูปร่างจำเพาะ คือมีเปลือกหุ้ม ภายในมีปลายประสาทที่นำไปสู่ประสาทรับความรู้สึก พบมากที่ริมฝีปาก ปลายนิ้วมือ และหัตถ์ และผิวหนังบริเวณต่างๆ ที่ต้องการรับความไวมากๆ ตัวรับชนิดนี้สามารถบอกตำแหน่งที่สัมผัสได้ดี และสามารถบอกรายละเอียดของสิ่งกระตุ้น ปรับตัวได้เร็วมาก ซึ่งแสดงว่าไวต่อการเคลื่อนไหวของตัวกระตุ้นเท่านั้น

3.ตัวรับที่ปลายสุดขยายโตออก เช่น Merkel's disc พบที่ปลายนิ้วมือ ต่างกับ Meissner's corpuscle ตรงที่ว่าปรับตัวได้ช้ากว่า และรับแรงกระตุ้นที่แรงกว่า จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลเมื่อถูกสัมผัสอยู่ตลอดเวลา พบได้ในบริเวณที่มีขนซึ่งจะไม่พบ Meissner's corpuscle

4.Hair and organ มีปลายประสาทอยู่ที่รากของขน ทำหน้าที่รับสัมผัส ปรับตัวได้เร็วมาก ถูกกระตุ้นได้โดยการเคลื่อนไหวของขน

5.Ruffini's end organ อยู่ลึกลงไปใ้ผิวหนังและเนื้อเยื่อเล็กๆของร่างกายลักษณะเป็นปลายประสาทที่มีแขนงมาก ปรับตัวช้า มีความสำคัญในการบอกความรู้สึกสัมผัสได้ตลอดเวลา และเกี่ยวกับแรงกดด้วย

6.Pacinian corpuscle อยู่ในผิวหนังและเนื้อเยื่อของร่างกาย ถูกกระตุ้นได้ง่ายโดยการเคลื่อนไหวเร็วๆ ของเนื้อเยื่อ และปรับตัวได้ง่ายมาก มีความสำคัญสำหรับการหาการสั่นสะเทือนของเนื้อเยื่อหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอื่นๆ

4.3.3.2 ชนิดการรับสัมผัส

การรับรู้ความรู้สึกสัมผัส (tactile sensation) อาจแบ่งได้ 2 ชนิด ซึ่งมีตัวรับและนำไปตามประสาทต่างชนิดกัน

1. สัมผัสละเอียด (tactile discrimination) ประกอบด้วยความรู้สึกของ deeper pressure , spatial localization และความรู้สึกเกี่ยวกับขนาดและรูปร่างของวัตถุ พวกนี้ตัวรับจะมีลักษณะพิเศษได้แก่ Meissner's corpuscle , pacinian corpuscle , Merkel's disc ซึ่งจะส่งสัญญาณผ่านประสาท ซึ่งมีความเร็วของการเคลื่อนที่ของกระแสประสาท 40-70 เมตรต่อวินาที

2. สัมผัสหยาบ (Simple touch หรือ gross touch) ได้แก่ความรู้สึกแบบเบาๆ และความรู้สึกหยาบของ tactile localization ตัวรับสัมผัสจะเป็นชนิด free nerve ending และพวก hair end organ บางอย่าง ซึ่งมีความเร็วของการนำกระแสประสาท 6-15 เมตรต่อวินาที

3. การรับรู้การสั่นสะเทือน (vibration) ตัวรับสัมผัสต่างๆทำหน้าที่รับความรู้สึกสั่นสะเทือนได้ จะทำงานเหมือนกับการรับสัมผัส ที่มีความไวต่อความถี่ต่างกัน เช่น pacinian corpuscle รับการสั่นสะเทือนได้ถึง 400-500 ครั้งต่อวินาที เนื่องจากสามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการกระตุ้นและส่งสัญญาณผ่านประสาท beta type A ซึ่งมีความไวมากกว่า 1,000 ครั้งต่อวินาที

เรอชโฮลด์ (Threshold) ของตัวรับของผิวหนังแตกต่างกันตามตำแหน่งต่างๆทั่วร่างกาย บริเวณใบหน้าโดยเฉพาะที่ริมฝีปาก และปลายนิ้วมือจะมีเรอชโฮลด์ (Threshold) ต่ำ ถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าบริเวณต้นขา และหลัง การตรวจสอบหาเรอชโฮลด์ (Threshold) นี้ใช้วิธีที่เรียกว่า ความสามารถในการแยกจุดสัมผัสเป็น 2 จุด (Two-point discrimination) ซึ่งระยะที่จุดทั้งสองห่างกันน้อยที่สุด ที่ยังรู้สึกได้ว่าเป็น 2 จุด ซึ่งพบว่าบริเวณของร่างกายที่จำเป็นต้องใช้งานละเอียด เช่น ปลายนิ้ว ริมฝีปาก จะได้ค่า Two-point discrimination ที่ต่ำประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของจุด 2 จุดบนผิวหนังบริเวณต่างๆโดยใช้ปลายคณิปหนีบกระดาษ [9]

ตำแหน่ง	ระยะน้อยสุด (mm)
ปลายนิ้ว	2-3
ริมฝีปากบน	5
แก้ม	6
จมูก	7
ฝ่ามือ	10
หน้าผาก	15
ท้อง	30

ตำแหน่ง	ระยะน้อยสุด (mm)
ปลายแขน	35
หลัง	39
หัวไหล่	41
ต้นขา	42
น่อง	45



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของจุด 2 จุดบนผิวหนังบริเวณต่างๆ โดยใช้ปลายคลิปหนีบกระดาษ [9]

4.4 เธรสโฮลด์ (Threshold) ของการเคลื่อนที่

เธรสโฮลด์ของการเคลื่อนที่ (Motion threshold) คือ ลักษณะการเคลื่อนไหวของร่างกายที่มนุษย์สามารถเริ่มรู้สึกได้ว่าตนเองกำลังเคลื่อนไหวเช่น ค่าเธรสโฮลด์ (Threshold) ของความเร่งเท่ากับ 0.1 m/s^2 หมายความว่าเมื่อมนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งเท่ากับ 0.1 m/s^2 นั้นมนุษย์จะเริ่มรู้สึกแล้วว่าตนเองกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งอยู่ ในทางกลับกันถ้ามนุษย์ถูกกระตุ้นด้วยความเร่งที่น้อยกว่า 0.1 m/s^2 แล้วมนุษย์จะไม่รู้สึกว่าจะตนเองกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

ตารางที่ 4.2 เธรสโฮลด์ (Threshold) ในการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

ความเร็วเชิงมุม (deg/sec) ข้อมูลจาก [16]		ความเร่งเชิงเส้น (m/sec^2) ข้อมูลจาก [16]	
Roll	2	X	0.17
Pitch	2	Y	0.17
Yaw	1.6	Z	0.28

บทที่ 5

เครื่องจำลองเสมือนจริงและสนามทดสอบย่อยส่วน

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในการเคลื่อนที่ของ simulator ประกอบด้วย จำนวนการเคลื่อนที่องศาอิสระ (Degree of freedom) และขอบเขตพื้นที่ทำงาน (Work space) รวมไปถึงการกำหนดระดับการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ระดับต่ำ (Simulator มีการเคลื่อนที่ตอบสนองเพียงเล็กน้อย) เป็นต้น

สนามทดสอบย่อยส่วนนี้ถูกสร้างไว้สำหรับยานยนต์ย่อยส่วน โดยได้มีการจำลองสภาพแวดล้อมให้มีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของยานยนต์ย่อยส่วน

5.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

5.2.1 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll – Movement)

การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll Movement) มีลักษณะดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll Movement)

5.2.2 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch – Movement)

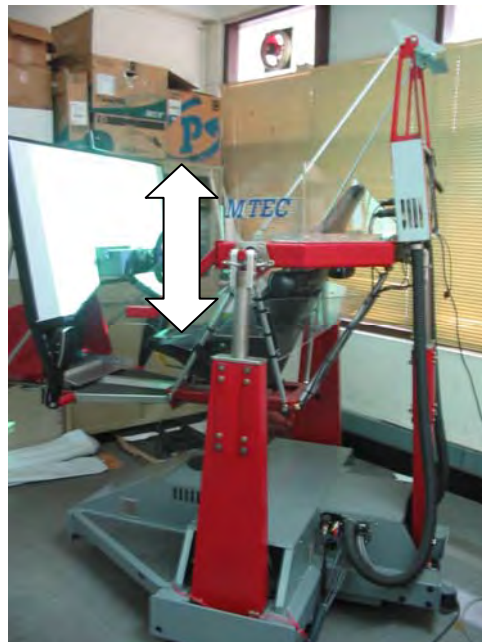
การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch Movement) มีลักษณะดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch Movement)

5.2.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

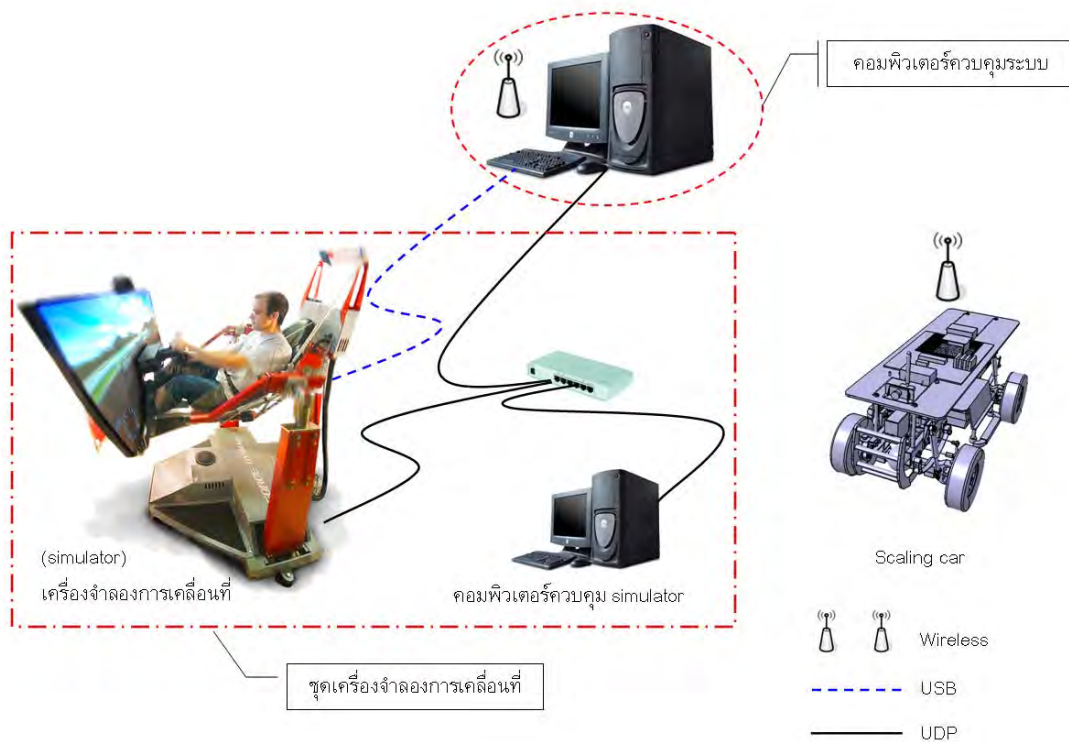
การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z มีลักษณะดังรูปที่ 5.3



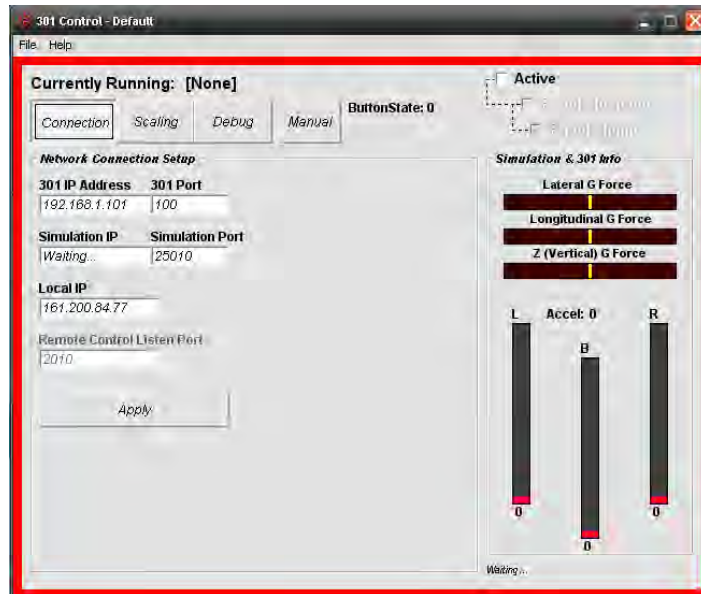
รูปที่ 5.3 การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

5.3. โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

การจำลองสถานะเสมือนจริง (Virtual reality) ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) นั้น จะต้องอาศัยข้อมูลจากโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) โดยตรง ซึ่งโปรแกรมการควบคุมนี้ ทางบริษัทผู้ผลิต (Forces Dynamic) เป็นผู้พัฒนาขึ้น โดยลักษณะของโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) มีลักษณะดังรูปที่ 5.4 โดยหน้าที่ของโปรแกรมนี้คือ การรับข้อมูลมาจาก คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ นำมาผ่านกระบวนการควบคุมขนาดของแรง และการเคลื่อนที่ต่างๆ เช่น การควบคุมขนาดระยะทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) , ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป



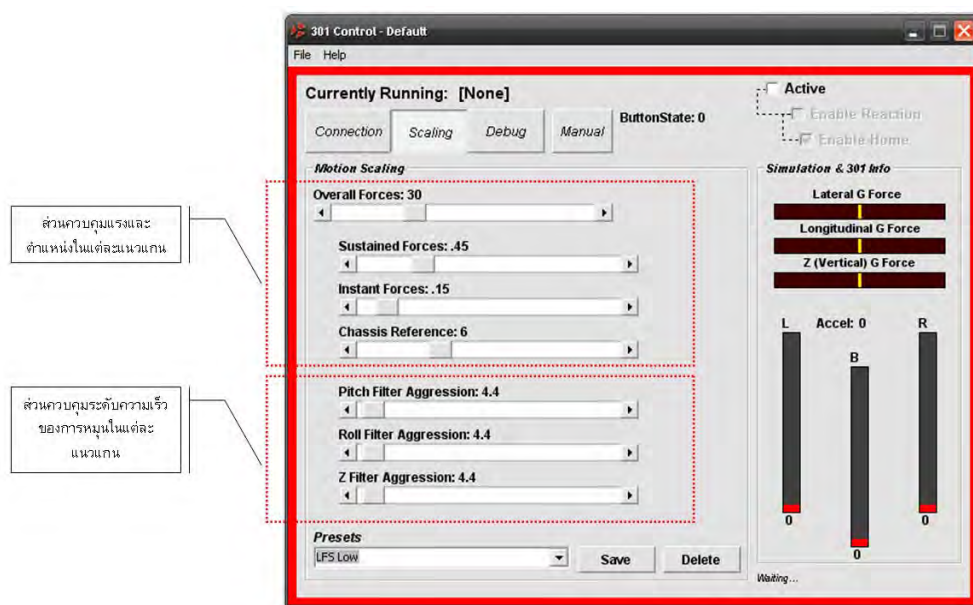
รูปที่ 5.4 การติดต่อสื่อสารโดยรวมของระบบ



รูปที่ 5.5 โปรแกรม 301 Control

โดยโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ในส่วนหน้าต่างของ Connection ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5 จะแสดงถึงสถานการณ์เชื่อมต่อต่างๆ ระหว่าง Simulator กับ คอมพิวเตอร์ควบคุม เช่น หมายเลข IP, UDP Port number เป็นต้น โดยหมายเลข IP จะมีทั้งหมด 3 ชุด ได้แก่

- Simulator หมายเลข IP = 192.168.0.101
- คอมพิวเตอร์ควบคุม Simulator หมายเลข IP = 192.168.0.102
- คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ หมายเลข IP = 192.168.0.103



รูปที่ 5.6 โปรแกรม 301 Control – Scaling

ส่วนหน้าต่างๆของ Scaling นี้ จะเป็นการกำหนดอัตราส่วน (Scale) ลักษณะการเคลื่อนที่ต่างๆ ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ดังนี้

Overall Force

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับแรง ที่ Simulator ทำงาน โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 100 โดย 100 จะรุนแรงที่สุด

Sustained Forces

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับการจำลองการเคลื่อนที่ความเร่งไปข้างหน้า และความเร่งด้านข้างของ Simulator โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 2 โดย 2 จะแสดงค่าระดับการจำลองมากที่สุด

Instant forces

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับการจำลองการเคลื่อนที่ความเร่งในแนวแกน Z โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 1 โดย 1 จะเป็นค่าระดับการจำลองมากที่สุด

Chassis reference

ในส่วนนี้จะกำหนดถึงระดับการเคลื่อนที่เชิงมุมของ Simulator ได้แก่ การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll) , การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch) โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 20 โดย 20 จะเป็นค่าระดับการจำลองที่มากที่สุด

Roll Filter Aggression

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X ของ Simulator โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 201 โดย 201 จะเป็นการเคลื่อนที่ในแบบ นุ่มนวลหรือ ช้ำที่สุด

Pitch Filer Aggression

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ของ Simulator โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 201 โดย 201 จะเป็นการเคลื่อนที่ในแบบ นุ่มนวลหรือ ช้ำที่สุด

Z Filter Aggression

ในส่วนนี้จะกำหนดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแกน Z ของ Simulator โดยจะมีตั้งแต่ 0 – 201 โดย 201 จะเป็นการเคลื่อนที่ในแบบ นุ่มนวลหรือ ช้ำที่สุด

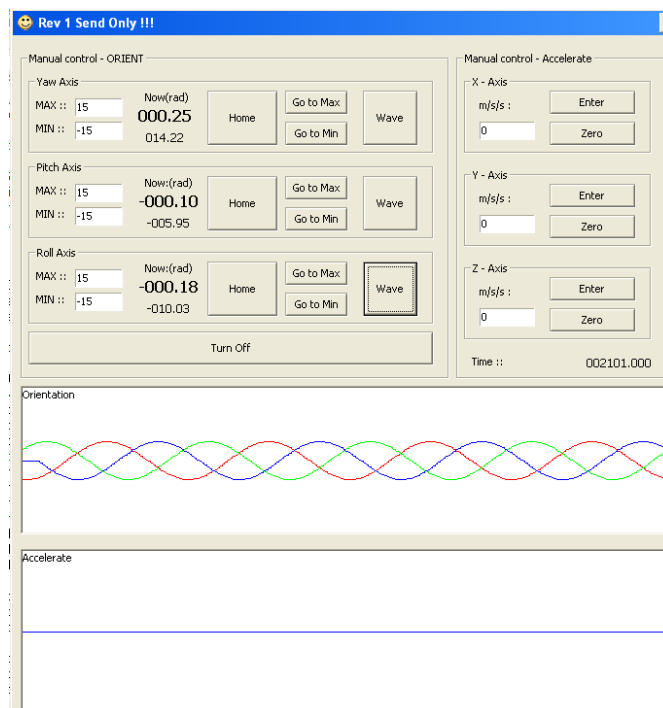
โดยในขั้นต้น โปรแกรมควบคุมการทำงาน Simulator นี้ได้กำหนดระดับการเคลื่อนที่ เป็น 3 ระดับ คือ Low , Medium , High ซึ่งแต่ละระดับ มีรายละเอียดดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในแต่ละโหมดการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง

Detail	Mode		
	Low	Medium	High
Overall Forces	30	68	100
Sustained Forces	0.45	0.45	0.45
Instant Forces	0.15	0.15	0.15
Chassis Reference	6	6	6
Pitch Filter Aggression	4.4	4.4	4.4
Roll Filter Aggression	4.4	4.4	4.4
Z Filter Aggression	4.4	4.4	4.4

5.4 การทดสอบโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

โดยทางคณะวิจัยต้องการศึกษาถึงการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของโปรแกรมหดดังกล่าว ดังนั้นทางคณะวิจัยจึงได้เขียนโปรแกรมการส่งข้อมูลขึ้น ดังรูปที่ 5.7 โดยจะเป็นการกำหนดค่าข้อมูล 2 ข้อมูลหลัก ได้แก่ ความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) กับการเคลื่อนที่เชิงมุม (Orientation)



รูปที่ 5.7 โปรแกรม Manual Control

5.4.1 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องจำลองเสมือนจริงเมื่อได้รับข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุม

ผู้วิจัยต้องการทดสอบการกำหนดอัตราส่วน (Scale) ของค่าการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เมื่อได้รับข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุม ในขณะที่ ความเร่งเชิงเส้นต่างๆ เท่ากับ 0 โดยมีเงื่อนไขโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ดังนี้

- Overall Forces = 100
- Sustained Forces = 0.2
- Instant Forces = 0.1
- Chassis Reference = 20
- Pitch Aggression = 10
- Roll Aggression = 10
- Z Aggression = 10

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างมุมที่ต้องการ (Desire angle) กับมุมที่ตรวจวัดได้ Simulator (Actual angle) ของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch angle)

Orientation	Program (Desire angle) (Degree)	Simulator (Actual angle) (Degree)
Pitch	10	9
	15	14
	20	18.5
	22	20
	24	22
	26	21.5
	-10	-9
	-15	-14
	-17	-15.5
	-20	-15.5

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างมุมที่ต้องการ (Desire angle) กับมุมที่ตรวจวัดได้ Simulator (Actual angle) ของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll angle)

Orientation	Program (Desire angle) (Degree)	Simulator (Actual angle) (Degree)
Roll	10	9
	15	15
	17	16
	19	19.5
	20	20
	22	20
	23	20.5

5.4.2 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องจำลองเสมือนจริงเมื่อได้รับข้อมูลการความเร่งเชิงเส้น

ผู้วิจัยต้องการทดสอบการกำหนดอัตราส่วน (Scale) ของค่าการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เมื่อได้รับข้อมูลความเร่งเชิงเส้น ในกรณีที่ การเคลื่อนที่เชิงมุมต่างๆ เท่ากับ 0 โดยเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) จะเคลื่อนที่เชิงมุม เพื่อจำลองการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อยส่วน ดังนี้

- เครื่องจำลองเสมือนจริงเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X เพื่อจำลองความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อยส่วนในแกน Y
- เครื่องจำลองเสมือนจริงเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y เพื่อจำลองความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อยส่วนในแกน X

กำหนดเงื่อนไขโปรแกรมควบคุมการทำงาน Simulator ดังนี้

- Overall Forces = 100
- Sustained Forces = 2
- Instant Forces = 0.5
- Chassis Reference = 20
- Pitch Aggression = 10
- Roll Aggression = 10

- Z Aggression = 10

ตารางที่ 5.4 การเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ในการจำลองความเร่งเชิงเส้น

Accelerate	Program (m/s/s)	Simulator (Degree)	Exact (Degree)
Ax	1	5	5.8
	2	11	11.5
	3	18	17
Ay	1	5	5.8
	2	10.5	11.5
	3	16.5	17

จากผลการทดสอบทั้ง 2 กรณี ทำให้ทางคณะวิจัยได้ทราบถึงการทำงานของโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) และขอบเขตการเคลื่อนที่จริง ของ เครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) นั่นคือ

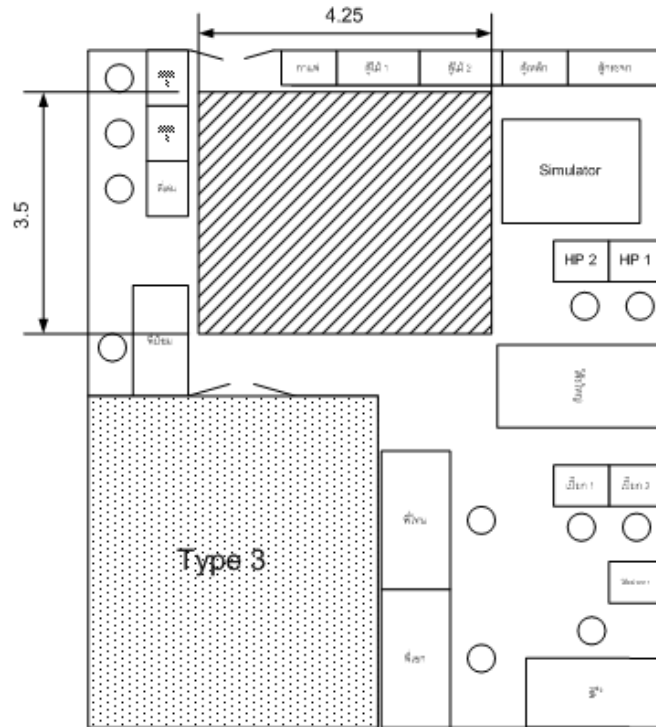
ตารางที่ 5.4 พื้นที่ทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง

Orientation	Maximum (Degree)	Minimum (Degree)
Pitch	20	-15
Roll	20	20

5.5. สนามทดสอบย่อยส่วน

5.5.1 สร้างสภาพแวดล้อมจริงย่อยส่วน

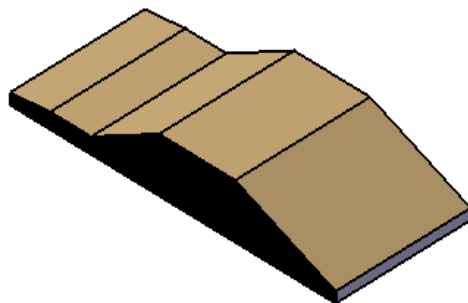
วัตถุประสงค์ของการสร้างสนามทดสอบคือการศึกษาการตอบสนองของยานยนต์ย่อยส่วนในสภาพแวดล้อมจริงที่มีสัดส่วนเชิงมิติที่สมมูลกัน ข้อมูลการตอบสนองของยานยนต์ย่อยส่วนนั้น จะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ (sensor) ที่ติดตั้งอยู่บนยานยนต์ย่อยส่วน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้งาน ในการออกแบบสนามทดสอบจริงย่อยส่วนต้องคำนึงถึงพื้นที่ในห้องปฏิบัติการด้วย โดยแบ่งการออกแบบเส้นทาง ออกเป็น 2 ส่วน หลักๆ คือ ส่วนทางตรง กับ ส่วนทางโค้ง



รูปที่ 5.8 ขนาดพื้นที่ภายในห้องวิจัย

ทางขึ้นเนิน

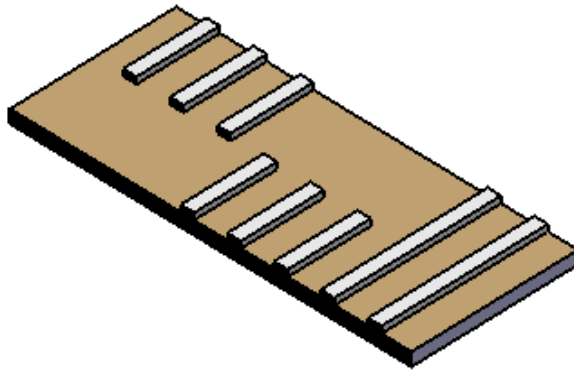
การออกแบบทางขึ้นเนินนั้นได้คำนึงถึงขนาดความยาวของยานยนต์ยอส่วนเป็นหลัก โดยได้ออกแบบ ให้มีการขึ้นเนินใน 2 ระดับ คือ เนินที่มีความเอียงน้อย (7 องศา) และเนินที่มีความเอียงมาก (30 องศา) เพื่อให้ผู้ขับขี่ (ซึ่งจะควบคุมอยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง รู้สึกถึงการขึ้นเนินที่มีความเอียง ต่างกัน ดังในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ทางขึ้นเนิน

ทางเนินระนาบขนาดเล็ก

การออกแบบทางเนินระนาบขนาดเล็กนั้น ต้องการให้ยานยนต์ย่อบนมีการเคลื่อนที่ผ่านเนินขนาดเล็ก สลับกันซ้าย-ขวา และเนินยาว ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ขับขี่ที่อยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) รู้สึกถึงการสั่นสะเทือน ทั้งด้านซ้ายและขวา ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ทางเนินระนาบขนาดเล็ก

ทางโค้ง

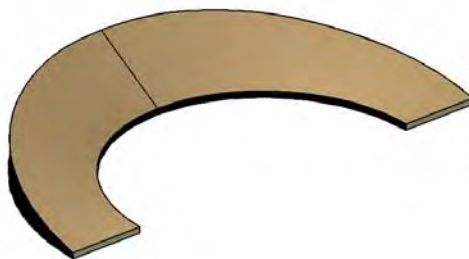
การออกแบบทางโค้งนั้นจะต้องคำนึงถึง ความเร็วของยานยนต์ย่อบนขณะเข้าโค้งเพื่อให้ยานยนต์ย่อบน สามารถเข้าโค้งได้ โดยไม่หลุดโค้ง โดยระดับความเร็วของยานพาหนะนั้นมี 3 ระดับ ตามจำนวนเกียร์ ดังนี้

เกียร์ 1 ความเร็วสูงสุดที่ 1 เมตรต่อวินาที

เกียร์ 2 ความเร็วสูงสุดที่ 1.8 เมตรต่อวินาที

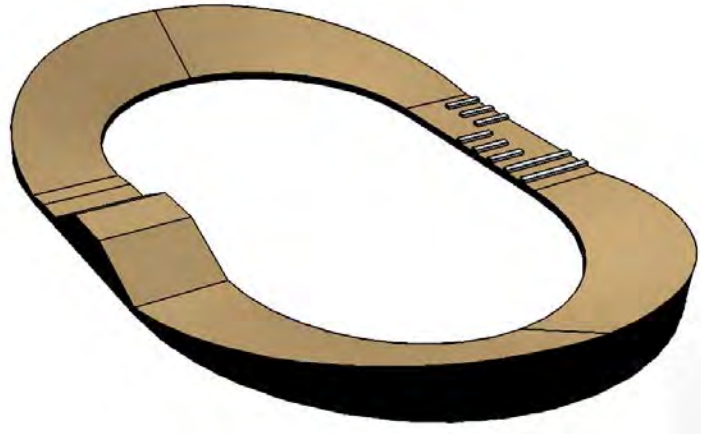
เกียร์ 3 ความเร็วสูงสุดที่ 2.8 เมตรต่อวินาที

ซึ่งที่มวิจัยได้คำนวณเพื่อถึงระดับความเร็วสูงสุด คือ เกียร์ 1 ซึ่ง เมื่อแทนลงในสมการ เราสามารถคำนวณและเลือกความชันความเอียงของถนน เท่ากับ 8 องศา ดังรูป



รูปที่ 5.11 ส่วนทางโค้ง

เมื่อออกแบบ ส่วนประกอบต่างๆ แล้ว จะมีรูปร่างสนามเป็นวงรีที่มีส่วนทางตรง พื้นเอียง ส่วนลูกระนาด และส่วนโค้ง



รูปที่ 5.12 สนามทดสอบ

5.5.2 การสร้างสนามทดสอบจริง

หลังจากการออกแบบสนามทดสอบเสร็จแล้ว จึงได้สร้างสนามทดสอบจริง โดยใช้วัสดุเป็นไม้ ทั้งสิ้น เพื่อนำหนักเบา ชิ้นส่วนต่างๆถอดประกอบได้ เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและจัดเก็บ



รูปที่ 5.13 สนามทดสอบเสร็จสมบูรณ์

5.5.3 การสร้างสภาพแวดล้อมจำลอง

การสร้างสภาพแวดล้อมจำลองจะต้องสอดคล้องกับสัดส่วนของยานยนต์ย่อส่วน ดังนั้นสภาพแวดล้อมทั้งหมดจึงต้องถูกย่อลงมาเท่ากับ 1 : 10 ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้พื้นที่บริเวณภายในของสนามสร้างสภาพแวดล้อมจำลองรวมถึงถนนหินกรวด เพื่อใช้ในการทดสอบควบคุมยานยนต์ผ่าน

เส้นทางขรุขระ โดยจากการศึกษาสนามทดสอบต่างๆ พบว่าถนนหินกรวดนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ หินกรวดหยาบและหินกรวดละเอียด โดยที่หินกรวดหยาบจะขนาดไม่เกินความกว้างหน้ายางล้อของยานพาหนะ



รูปที่ 5.14 ถนนหินกรวดละเอียด (ซ้าย) ถนนสนามหญ้า (ขวา)



รูปที่ 5.15 สนามทดสอบและสภาพแวดล้อมย่อยส่วน

บทที่ 6

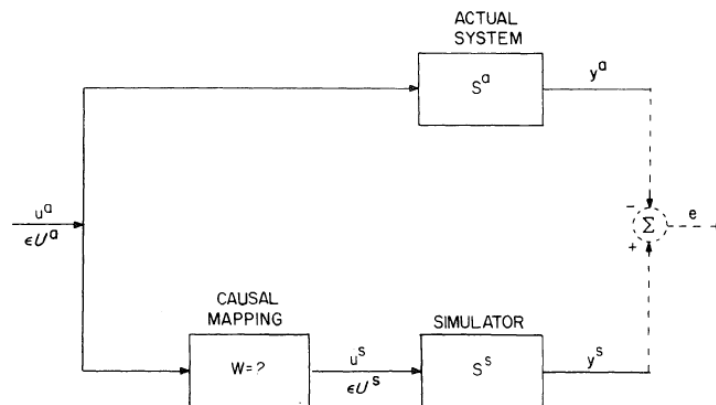
ตัวกรองเสมือนจริง

(Washout filter)

6.1 บทนำ

ตัวกรองเสมือนจริง คือตัวกรองสำหรับการสร้างความเสมือนจริง (Virtual reality) เป็นกระบวนการที่จำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ต่างๆ ด้วยการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ซึ่งมีพื้นที่ทำงานที่จำกัด การออกแบบตัวกรองสำหรับการจำลองความเสมือนจริง นี้ได้ถูกออกแบบภายใต้หลักการรับรู้ของมนุษย์ และกระบวนการนี้จะช่วยทำให้มนุษย์มีความรู้สึกเสมือนกับว่ากำลังนั่งอยู่ในยานยนต์นั้น ทั้งที่จริงแล้วมนุษย์กำลังนั่งอยู่ภายในเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) โดยตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) เป็นกระบวนการที่ให้ความสำคัญในการจำลองการเคลื่อนที่และความเร่งต่างๆที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ จากหลักการรับรู้ของมนุษย์ (Human perception) มนุษย์สามารถรับรู้ถึงความเร่งได้จากระบบหูชั้นใน (Vestibular system) โดยความเร่งที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้นั้น ประกอบด้วยความเร่งเชิงเส้น (Linear Acceleration) และความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) ดังนั้นความเร่งทั้งสองจึงเป็นตัวแปรที่จะนำมาประมวลผลด้วยกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง

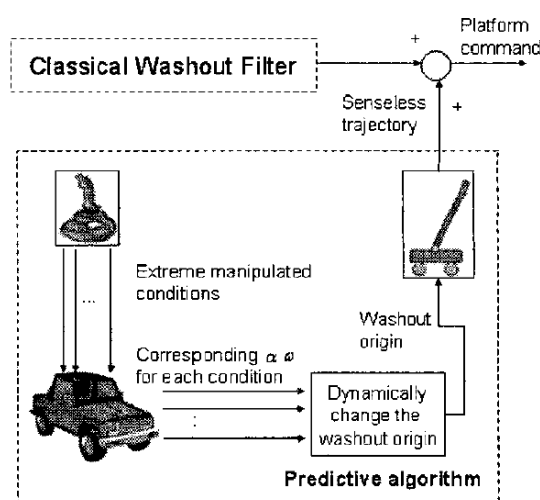
งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับ washout algorithm นั้นมีดังนี้ Raphael sivan [16] ได้นำเสนอระบบควบคุมแบบออปติมัล (Optimal control) ซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) สำหรับเครื่องบิน โดยการออกแบบระบบควบคุมออปติมัล (Optimal) นี้ได้นำเอากระบวนการรับรู้ของมนุษย์ (Human perception) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยดังรูป



รูปที่ 6.1 Optimal Simulator Design Problem [16]

โดยที่ระบบการรับรู้ของมนุษย์นี่จะเป็นตัววัดความแรงที่มนุษย์รู้สึกได้ เมื่อนั่งอยู่บนเครื่องบินจริงๆ มาเปรียบเทียบกับความแรงที่มนุษย์รู้สึกได้ เมื่อนั่งอยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) แล้วทำการลดค่า (minimize) ความแตกต่างของความแรงทั้งสอง

Su-Chiun Wang [17] ได้นำเสนอ Predictive washout Filter design for VR-based motion simulator ซึ่งเป็นวิธีเกี่ยวกับการจัดการลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยใช้พารามิเตอร์ของตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) เดิม



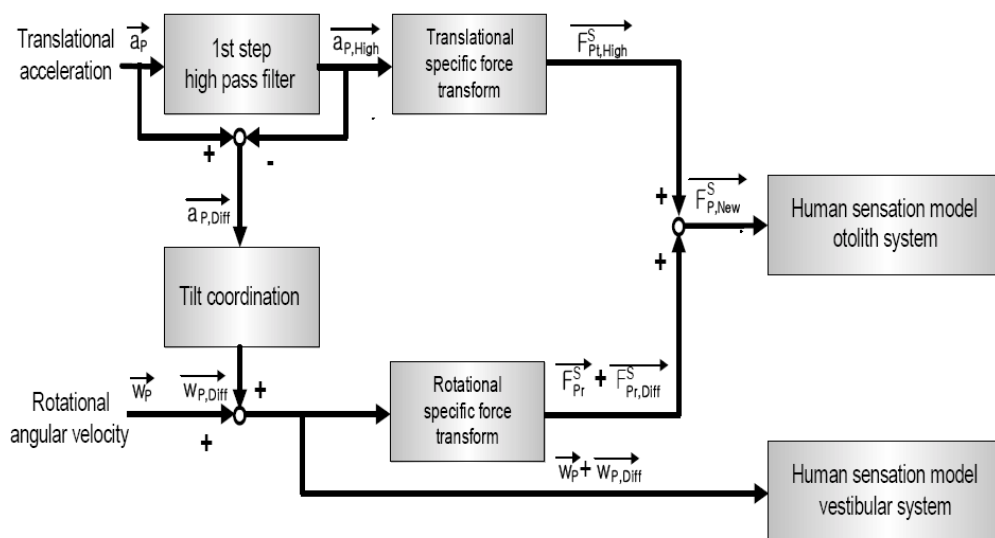
รูปที่ 6.2 โครงสร้างของกระบวนการทำนายล่วงหน้า (Schematics of Predictive algorithm) [17]

โดยการทำงานของ Predictive function นั้นจะเป็นการสร้างเส้นการเคลื่อนที่ (trajectory) ที่ต้องการจากการคำนวณผ่านสมการพลศาสตร์ยานยนต์ ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด จากนั้น กระบวนการ predictive จะคำนวณค่าพลศาสตร์ยานยนต์ที่จะเกิดขึ้นในเวลาถัดไปได้ ซึ่งทำให้สามารถที่จะคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ได้ล่วงหน้า ทำให้ระบบทำนายล่วงหน้า (Predictive) สามารถคำนวณเพื่อระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มากขึ้นจากระบบเดิม

Thong-Shing Hwang [18] ได้นำเสนอวิธี Optimal Genetic and Adaptive fuzzy washout filter ซึ่งเป็นกระบวนการคำนวณเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ (adaptive) ของตัวกรอง (Filter) ได้ตลอดเวลาขณะทำงานจริง โดยใช้กระบวนการควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy control) เข้ามาช่วย รวมถึงการพัฒนาแบบออปติมัล (Optimal) โดยนำเอาวิธี Genetic algorithm เข้ามาช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่า

ออปติมัล (Optimal) พารามิเตอร์ ของช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ ภายหลังจากการทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างความเร่งที่รับรู้มนุษย์ได้จริงบน เครื่องบิน กับความเร่งที่มนุษย์รับรู้ได้ขณะ อยู่บน เครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าทั้งสองไม่มีความ แตกต่างกันมากนัก

Ki Sung You [19] ได้นำเสนอการพัฒนาระเบียบวิธีของตัวกรอง โดยการใช้วิธีการคำนวณมุม เอียงแบบใหม่ (New Tilt coordinate) และวิธีการย้อนกลับตำแหน่งเดิม (Return mode) โดยจาก การศึกษาของ Ki Sung You พบว่าระเบียบวิธีของตัวกรองเสมือนจริงแบบคลาสสิก (Classical washout) ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป มีข้อบกพร่องคือ ความไม่เสมือนจริงในการจำลองการเอียง ดังนั้น Ki Sung You จึงได้พัฒนาวิธีการคำนวณมุมเอียงแบบใหม่ (New tilt coordinate) ขึ้น โดยนำเอา ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass Filter) ออกไปตั้งรูป และได้พัฒนาระบบการย้อนกลับตำแหน่งเดิม (Return mode) เพื่อลดเวลา การเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) กลับสู่ จุดเริ่มต้น (origin) ของระบบตัวกรองเสมือนจริงแบบคลาสสิก (Classical washout)

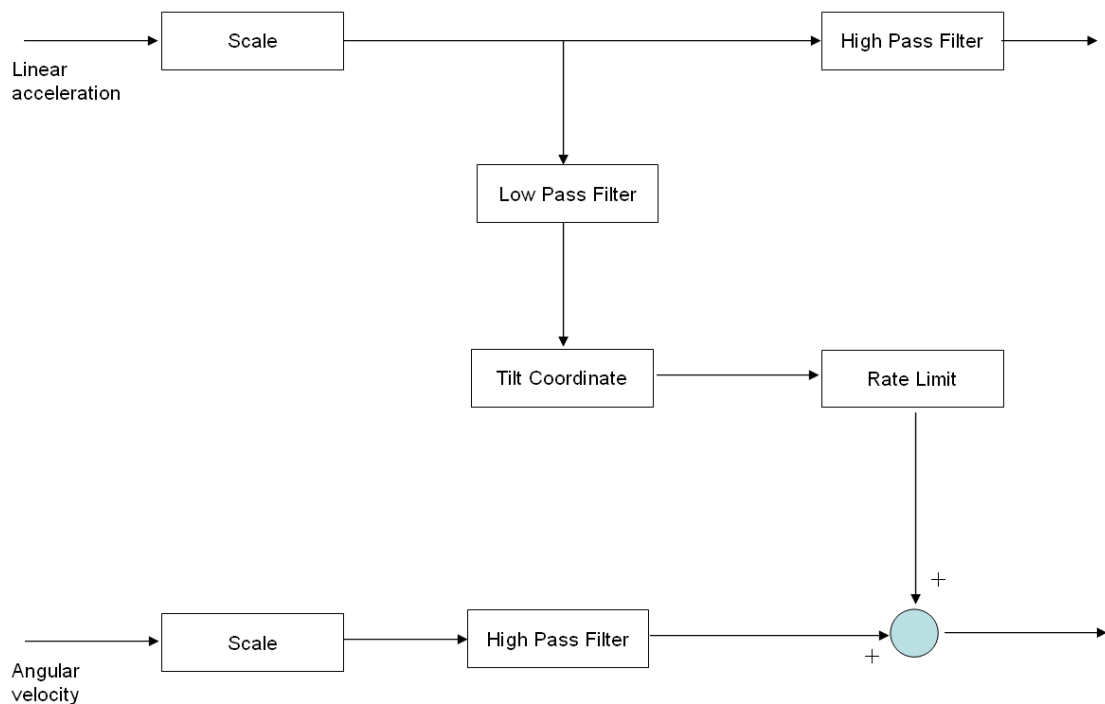


รูปที่ 6.3 Schematic diagram for sensation of Motion by classical tilt coordinate [19]

6.2. ตัวกรองเสมือนจริงแบบคลาสสิก (Classical washout)

ตัวกรองเสมือนจริงแบบคลาสสิก (Classical washout) ได้ถูกนำมาใช้กับเครื่องจำลองเสมือนจริงอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงการค้า (Commercial) และงานวิจัยต่างๆ [18], [19] โดย กระบวนการนี้ได้ถูกออกแบบโดยอาศัยหลักการรับรู้ของมนุษย์ ดังนั้นข้อมูลที่นำมาประมวลผล จะ

ประกอบด้วยข้อมูลความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) และข้อมูลความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ดังที่แสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 Classical Washout

การทำงานของตัวกรองเสมือนจริงแบบคลาสสิก (Classical washout) นี้จะเริ่มจากการนำเอาข้อมูลความเร่งเชิงเส้นมาผ่านขั้นตอนกำหนดอัตราส่วน (scale) เพื่อให้ค่าข้อมูลความเร่งนี้มีขนาดเพียงพอที่ เครื่องจำลองเสมือนจริงสามารถทำงานได้ ต่อจากนั้นข้อมูลจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะถูกนำไปผ่านตัวกรองความถี่สูง เพื่อที่จะกำจัดข้อมูลที่มีความถี่ต่ำออกไป จากนั้นข้อมูลที่ผ่านจากตัวกรองนี้จึงจะถูกส่งไปที่เครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ซึ่งโดยปกติจะเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ที่ความเร่งเชิงเส้นในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น จำลองสภาวะช่วงที่ยานพาหนะเริ่มเคลื่อนที่ เป็นต้น และส่วนที่สองนี้ ข้อมูลจะถูกนำไปผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ เพื่อกำจัดข้อมูลที่มีความถี่สูง ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจจะเป็นข้อมูลความเร่งที่เกิดจากเอียง หรือความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการคำนวณหาการเอียง เพื่อให้ได้ข้อมูลมุมการเอียง จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการจำกัดความเร็วในการเอียง ซึ่งระดับความเร็วในการเอียงนั้นจะต่ำกว่าที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมนุษย์ไม่รับรู้ว่าการเอียงเกิดขึ้น ณ ขณะนั้น โดยจุดประสงค์ของการเอียงนี้เพื่อเป็นการจำลองความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ เนื่องจากเมื่อมนุษย์เกิดการเอียงของตำแหน่งศีรษะแล้ว มนุษย์จะสามารถรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลกได้ และเมื่อข้อมูลผ่านขั้นตอนนี้แล้ว ข้อมูลจะถูกนำไปรวม

กับข้อมูลความเร็วเชิงมุมที่ผ่านการกำหนดอัตราส่วน และตัวกรองความถี่สูง เพื่อส่งข้อมูลเหล่านี้ไปให้เครื่องจำลองเสมือนจริง สำหรับการจำลองการเคลื่อนเชิงมุม

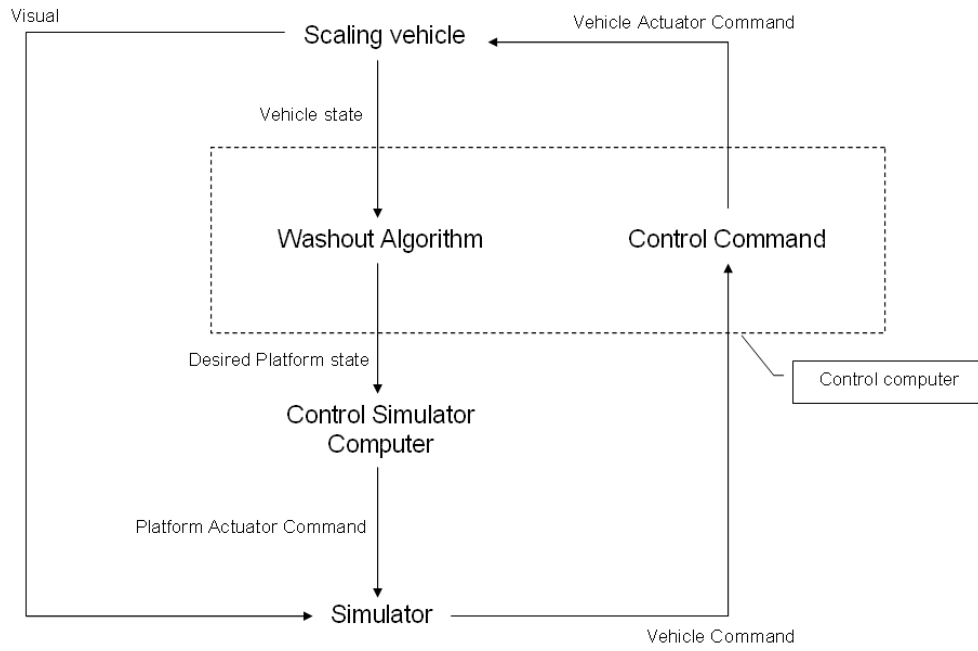
6.3 การออกแบบตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) สำหรับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) แบบ 3 องศาอิสระ

เครื่องจำลองเสมือนจริงที่จะสามารถตอบสนองกับข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการตัวกรองเสมือนจริงได้อย่างดีนั้นควรจะมีการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระ ประกอบด้วยการเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 แนวแกน (X, Y และ Z) และการเคลื่อนที่เชิงมุม 3 แนวแกน (X, Y และ Z) โดยข้อเสียของเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบ 6 องศาอิสระนี้คือต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในหลายๆงานวิจัยจึงเลือกใช้เครื่องจำลองเสมือนจริงแบบ 3 องศาอิสระ

เครื่องจำลองความเสมือนจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระประกอบด้วย การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X, การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y และการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z ดังที่กล่าวมาในบทที่ 5 โดยกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) จะทำหน้าที่รับข้อมูลสถานะของยานยนต์ย่อยส่วน (Vehicle state) ประกอบด้วย

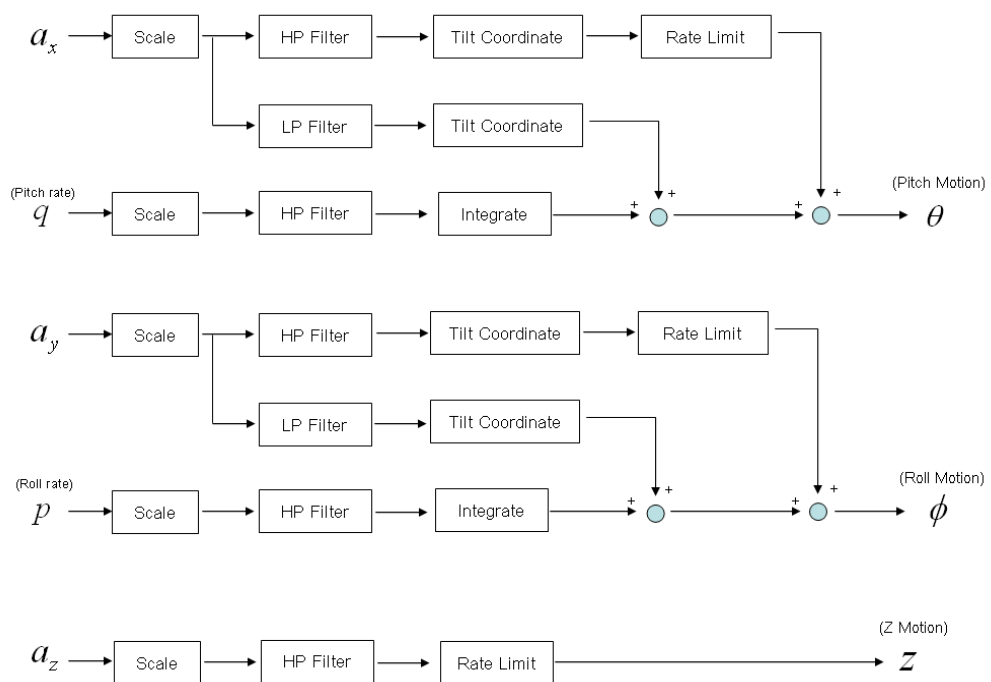
- ความเร่งเชิงเส้นแกน X
- ความเร่งเชิงเส้นแกน Y
- ความเร่งเชิงเส้นแกน Z
- ความเร็วเชิงมุมแกน X (Roll rate)
- ความเร็วเชิงมุมแกน Y (Pitch rate)

ภายหลังจากข้อมูลเหล่านี้ถูกประมวลผลด้วยตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) แล้ว ข้อมูลที่ได้นี้จะถูกส่งไปให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อจำลองสภาวะการเคลื่อนที่ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.5 โดยกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจาก ตัวกรองแบบคลาสสิก (Classical washout)



รูปที่ 6.5 การทำงานของตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter)

การออกแบบตัวกรองเสมือนจริงที่เหมาะสมกับเครื่องจำลองเสมือนจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง เช่น พื้นที่การทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อกำหนดขอบเขตในการจำลองความเสมือนจริง, จำนวนองศาอิสระ เพื่อกำหนดลักษณะการเคลื่อนไหวของเครื่องจำลองเสมือนจริงได้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 Washout Algorithm

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน X นี้ ตัวแปรสำคัญที่จะนำมาประมวลผลคือ ความเร่งเชิงเส้นแกน X (a_x) และ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Y (Pitch rate) โดย a_x จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการกำหนดอัตราส่วน (Scaling) เพื่อให้เครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) สามารถแสดงผลได้ภายในขอบเขตการทำงาน (Workspace) ต่อจากนั้นความเร่งจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน เนื่องจากความเร่งที่อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ตรวจวัดได้นั้น จะประกอบไปด้วย ความเร่งที่เกิดจากการเร่งไปด้านหน้าของรถ กับ ความเร่งที่เกิดเนื่องจากการดึงดูดของโลก ดังนั้นจึงต้องนำแยกความเร่งทั้งสองออกจากกัน โดยส่วนหนึ่งจะนำไปผ่านตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) และอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) โดยข้อมูลที่ได้จากตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) จะเป็นความเร่งที่มาจากคนขับเหยียบคันเร่ง ซึ่งเป็นความเร่งเคลื่อนที่ไปด้านหน้าที่มนุษย์รับรู้เมื่อขับอยู่บนยานพาหนะ ซึ่งเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) สามารถจำลองความเร่งนี้ได้จากการเอียง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) จะต้องนำเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณมุมเอียง (Tilt Coordinate) เพื่อคำนวณหามุมการเอียงของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำข้อมูลมาผ่านกระบวนการจำกัดความเร็ว (Rate Limit) เนื่องจาก ในการจำลองความเร่งนี้ มนุษย์จะถูกห่มุนด้วยความเร็วเชิงมุมที่ต่ำกว่า ความเร็วเชิงมุมที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ (Threshold) เพื่อให้มนุษย์รับรู้ความเร่งเชิงเส้นอย่างเดียวนั่นเอง หลังจากนั้นจึงนำมุมที่คำนวณได้ ป้อนให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

สำหรับข้อมูลความเร่งส่วนที่สอง ซึ่งถูกส่งให้กับตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) นี้ จะเป็นการจำลองความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อเกิดการเอียง เช่นในขณะที่ยานขึ้นเนิน ถ้าตัวของรถเกิดการเอียงด้านหน้า เป็นต้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) จะเป็นการแสดงสภาวะการเอียงของรถ ต่อจากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการคำนวณมุมเอียง (Tilt Coordinate) เพื่อคำนวณหามุมที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความเร่ง ดังสมการที่ 6.1 เพื่อนำข้อมูลส่งไปให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (6.1)$$

ข้อมูลความเร่งเชิงมุมรอบแกน Y (Pitch rate) จะถูกนำมาผ่านตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) เพื่อที่จะได้แยกข้อมูลในช่วงความถี่ต่ำ (Low frequency) ออกไป เนื่องจาก ข้อมูลในช่วงความถี่ต่ำ (Low frequency) นั้นสามารถหาได้แล้วจากความเร่งเชิงเส้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้

จากตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) จะเป็นการตอบสนองเชิงมุมในช่วง High frequency จากนั้นจึงนำข้อมูลผ่านกระบวนการอินทิเกรต (Integrate) เพื่อคำนวณจากความเร็วเชิงมุม เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม จากนั้นจึงจะส่งให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch motion) ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน X นั้นจะประกอบด้วยมุมที่เกิดจากการจำลองความเร่งเคลื่อนที่ไปด้านหน้า รวมถึงการจำลองการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เกิดจากการเอียงของยานพาหนะรอบแกน Y และมุมที่เกิดจากการตอบสนองในช่วงความถี่สูง (High frequency)

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ใช้ข้อมูลความเร่งในแกน Y (a_y) และความเร็วเชิงมุมรอบแกน X (Roll rate) สำหรับขั้นตอนในการประมวลผลต่างๆ ของ a_y นั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับ a_x โดยการคำนวณมุมเอียง (Tilt Coordinate) นั้นใช้รูปแบบสมการที่ (6.2) รวมถึงขั้นตอนการประมวลผลต่างๆ ของความเร็วเชิงมุมรอบแกน X ด้วยเช่นกัน ซึ่งในท้ายที่สุดของการประมวลผล จะได้ค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ที่จะส่งไปให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ซึ่งจะประกอบไปด้วย มุมที่เกิดจากการจำลองความเร่งเคลื่อนที่ไปด้านข้างรวมถึงการจำลองการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เกิดจากการเอียงของยานพาหนะรอบแกน X ที่เกิดจากการตอบสนองในช่วงความถี่สูง (High frequency)

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{a_y}{g}\right) \quad (6.2)$$

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

การจำลองการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z เริ่มจากการนำค่าข้อมูลความเร่งในแนวแกน Z ผ่านการกำหนดอัตราส่วน (Scale) เพื่อให้เครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) สามารถจำลองความเสมือนจริงได้ภายในพื้นที่ทำงาน (Workspace) ที่จำกัด จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งให้กับตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter) จากนั้นข้อมูลจะถูกประมวลผลด้วยกระบวนการจำกัดความเร็ว (Rate Limit) โดยเนื่องจาก ในการจำลองความเร่งในแกน Z นี้ มนุษย์มีความสามารถในการรับรู้ถึงความเร่งในแกน Z ได้ถ้าค่าความเร่งในแกน Z นั้นมีค่ามากกว่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ซึ่งจากขั้นตอนของ กระบวนการจำกัดความเร็ว (Rate Limit) นี้จะทำให้ข้อมูลบางส่วนที่จำเป็นต่อการรับรู้ของมนุษย์เท่านั้นที่จะนำไปแสดงผล หลังจากนั้นจึงนำมุมที่คำนวณได้ ป้อนให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

6.4 การวิเคราะห์และปรับปรุงความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้

อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น (Xbow) ที่ผู้วิจัยได้ติดตั้งบนยานยนต์ยี่ห้อส่วนนั้น สามารถตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ยี่ห้อส่วนได้ โดยความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้นั้นจะประกอบไปด้วยความเร่ง 2 อย่างด้วยกันคือ ความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่เชิงเส้น กับ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravity force) ซึ่งตรวจวัดได้เมื่อเกิดการเอียง

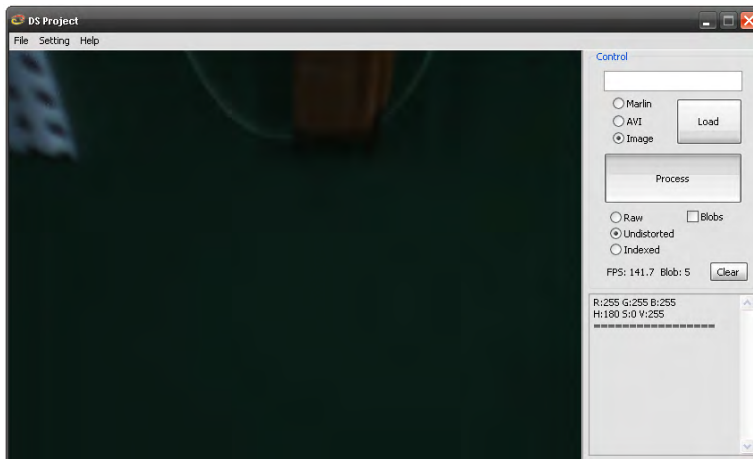
$$a_{\text{sensor}} = a_{\text{movement}} + a_{\text{gravity}} \quad (6.3)$$

ในกรณีที่

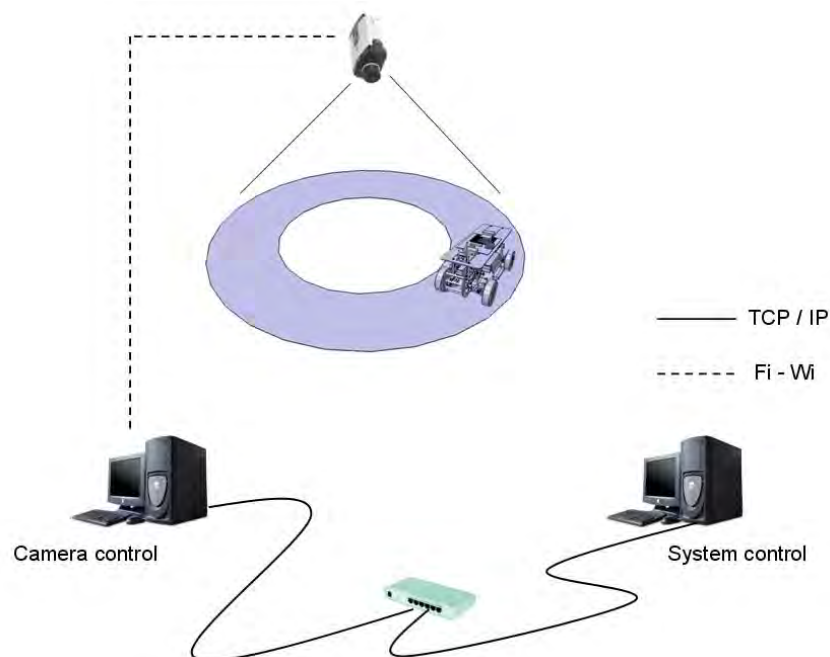
a_{sensor}	หมายถึง ความเร่งที่อุปกรณ์ตรวจวัดสามารถวัดได้
a_{movement}	หมายถึง ความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่
a_{gravity}	หมายถึง ความเร่งที่เกิดจากการเอียง

เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณหามุมเอียงของยานยนต์ยี่ห้อส่วนนั้น มีตัวแปรค่าความเร่งเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลจากการที่ความเร่งที่ตรวจวัดได้นั้น เป็นความเร่งรวมระหว่างความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ กับความเร่งเนื่องจากการเอียง จึงส่งผลกับการคำนวณหามุมเอียงของยานยนต์ยี่ห้อส่วนโดยตรง เช่น ขณะที่ยานยนต์ยี่ห้อส่วนเริ่มเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง โดยวิ่งบนเส้นทางเรียบปกติ ค่ามุมเอียงที่โปรแกรมคำนวณได้ในช่วงขณะนั้นมีค่ามากกว่าปกติ สาเหตุเนื่องจากในช่วงที่ยานยนต์เริ่มเคลื่อนที่จะเกิดความเร่งเนื่องจากการเคลื่อนที่จะมีค่ามาก ในขณะที่ความเร่งเนื่องจากการเอียงจะมีน้อยมาก ทำให้ความเร่งรวม ที่อุปกรณ์ตรวจวัดได้นั้นมีค่ามาก ซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงนั้นการเอียงของยานยนต์ที่เกิดขึ้นจริงซึ่งมีค่าน้อย

จากความแตกต่างของมุมเอียงของยานยนต์ยี่ห้อส่วนระหว่างค่ามุมเอียงที่โปรแกรมคำนวณได้ กับค่ามุมเอียงที่เกิดขึ้นจริงนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้แก้ปัญหาโดยการหาวิธีตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ เพื่อคำนวณหาความเร่งที่เกิดจากการเอียงเพียงอย่างเดียว โดยการนำค่าความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ นำมาแทนค่าในสมการข้างต้น ซึ่งวิธีในการตรวจหาความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่นั้น ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้การติดตั้งกล้องจับภาพของยานยนต์ยี่ห้อส่วนขณะเคลื่อนที่ โดยทำการติดตั้งไว้บนเพดานของห้องวิจัย แล้วนำข้อมูลที่กล้องตรวจจับได้มาคำนวณเพื่อหาความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6.7 โปรแกรมรับภาพจากกล้อง (ซ้าย) , กล้อง (ขวา)



รูปที่ 6.8 การติดต่อสื่อสารระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ควบคุม

การรับข้อมูลภาพจากกล้องใช้โปรแกรกดังรูปที่ 6.8 โดยโปรแกรมนี้อาศัยติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของกล้อง ซึ่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ที่รับข้อมูลจากกล้องนี้จะส่งข้อมูลมาให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมส่วนกลางผ่านทางระบบ TCP โดยข้อมูลที่ส่งมาให้นี้จะประกอบด้วย ความเร็วเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (แกน X) และความเร่งด้านข้าง (แกน Y)



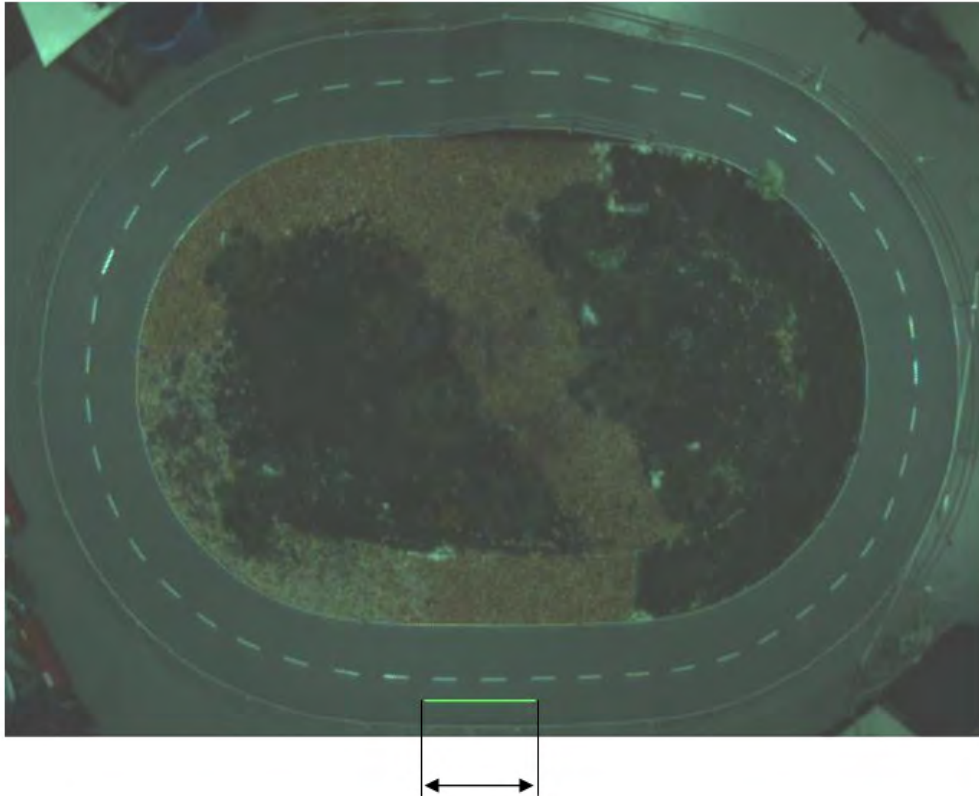
รูปที่ 6.9 ยานยนต์ย่อส่วนที่ติดกระดาษสีเพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับกล้องจับภาพ



รูปที่ 6.10 ภาพของยานยนต์ย่อส่วนที่ได้จากกล้องจับภาพด้านบน

จากรูปที่ 6.10 แสดงถึงภาพที่ได้จากการตรวจจับของกล้องจับภาพด้านบนโดยจะเห็นได้ว่ามีจุดสีเขียวและจุดสีแดง ซึ่งทั้งสองจุดนี้ จะเป็นจุดอ้างอิงของยานยนต์ย่อส่วนสำหรับการนำไปคำนวณหาตำแหน่งของยานยนต์ย่อส่วน รวมถึงการคำนวณทิศทางและการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Z

โดยคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของกล้องจับภาพ (Camera control computer) จะสามารถรู้ตำแหน่งของยานยนต์ย่อยส่วนในพิกัดของ pixel ซึ่งเป็นขนาดหน่วยความกว้างของภาพ จากนั้นจึงจะส่งข้อมูลไปให้กับคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ เพื่อคำนวณหาความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อยส่วนในขั้นต่อไป



รูปที่ 6.11 การปรับเทียบความยาวของเส้นที่ได้จากกล้องจับภาพด้านบน

การปรับเทียบตำแหน่งของยานยนต์ย่อยส่วนที่ได้จากกล้องจับภาพด้านบนกับตำแหน่งที่ตรวจวัดได้จากจริงบนสนามจำลอง นั้นสามารถทำได้โดยวัดขนาดของเส้นภายในภาพที่ได้จากกล้องตรวจจับ จากนั้นจึงนำมาปรับเทียบกับความยาวของเส้นที่วัดได้จากบนสนาม ซึ่งมีความสัมพันธ์เท่ากับ 1 เมตร = 250 Pixels โดยความสัมพันธ์นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณในโปรแกรม เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร่งของยานยนต์ย่อยส่วนในขั้นต่อไป



รูปที่ 6.12 ภาพถ่ายจากกล้องที่ติดตั้งบนเพดาน

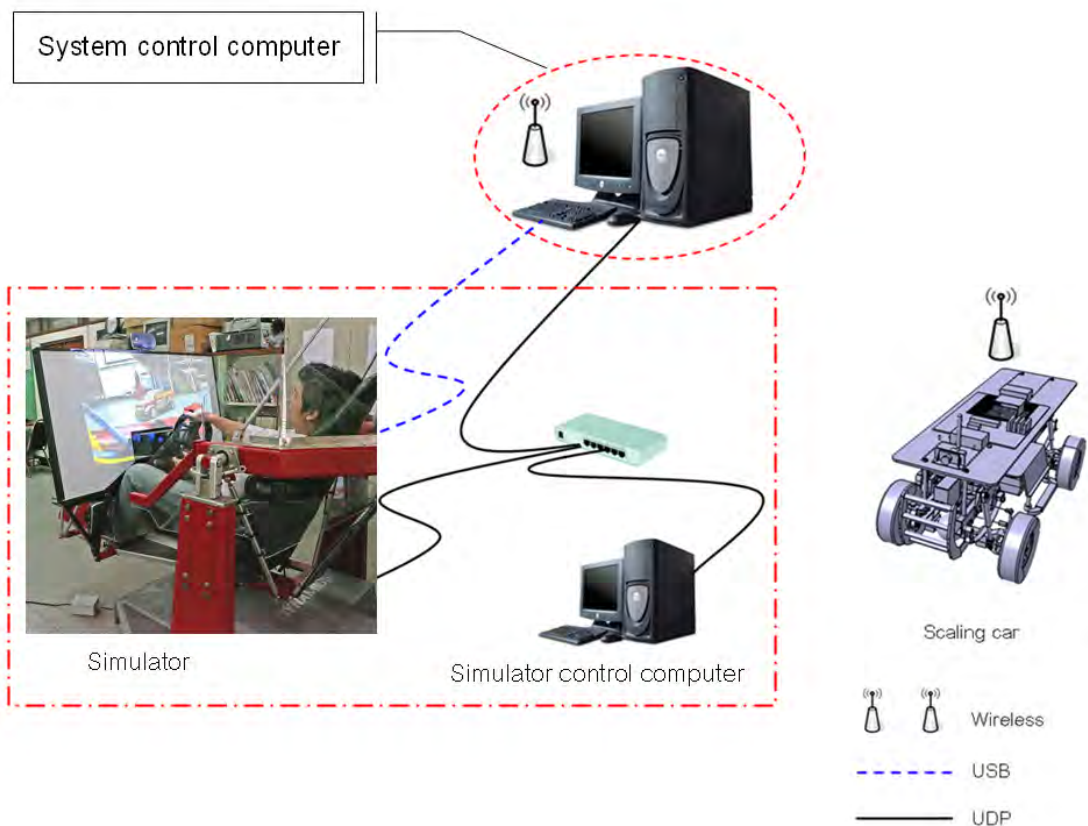
เมื่อคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบได้รับข้อมูลความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่มาแล้ว จึงสามารถคำนวณหาความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเกิดจากการเอียงได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณมุมการเอียงของยานยนต์ย่อยส่วนให้ใกล้เคียงกับมุมเอียงที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อยส่วนจริงๆได้ ทำให้ผู้ขับขี่ที่ควบคุมอยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) รู้สึกเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น

บทที่ 7

ระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผล

7.1 บทนำ

ระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผล มีหน้าที่เป็นตัวกลาง ในการติดต่อสื่อสาร ระหว่างยานยนต์ย่อยส่วนและเครื่องจำลองเสมือนจริง โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถ ควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะย่อยส่วนได้อย่างอิสระ โดยที่ผู้ควบคุมนั่งอยู่ภายในเครื่อง จำลองเสมือนจริง (Simulator) ระบบควบคุมจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ควบคุม มาประมวลผล แล้วส่งข้อมูลออกไปยังยานยนต์ย่อยส่วนเพื่อให้ยานยนต์ย่อยส่วนสามารถเคลื่อนที่ตามที่ผู้ควบคุม ต้องการได้ ซึ่งในขณะเดียวกันยานยนต์ย่อยส่วนก็จะส่งข้อมูลสถานะ (เช่น ข้อมูลความเร็วเชิงเส้น, มุมเลี้ยวพวงมาลัย เป็นต้น) ออกมาให้กับระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผล ซึ่ง ระบบควบคุมนี้ก็จะนำเอาข้อมูลสถานะนี้ไปประมวลผล เตรียมส่งออกไปยังเครื่องจำลองเสมือน จริง (Simulator) เพื่อให้ เครื่องจำลองเสมือนจริง สามารถเคลื่อนไหวและทำให้ผู้ควบคุมที่อยู่ ภายในเกิดความรู้สึกเสมือนจริง ดังรูป



รูปที่ 7.1 ระบบควบคุม

7.2 ระบบติดต่อสื่อสาร

สามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

7.2.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ (System control computer) กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

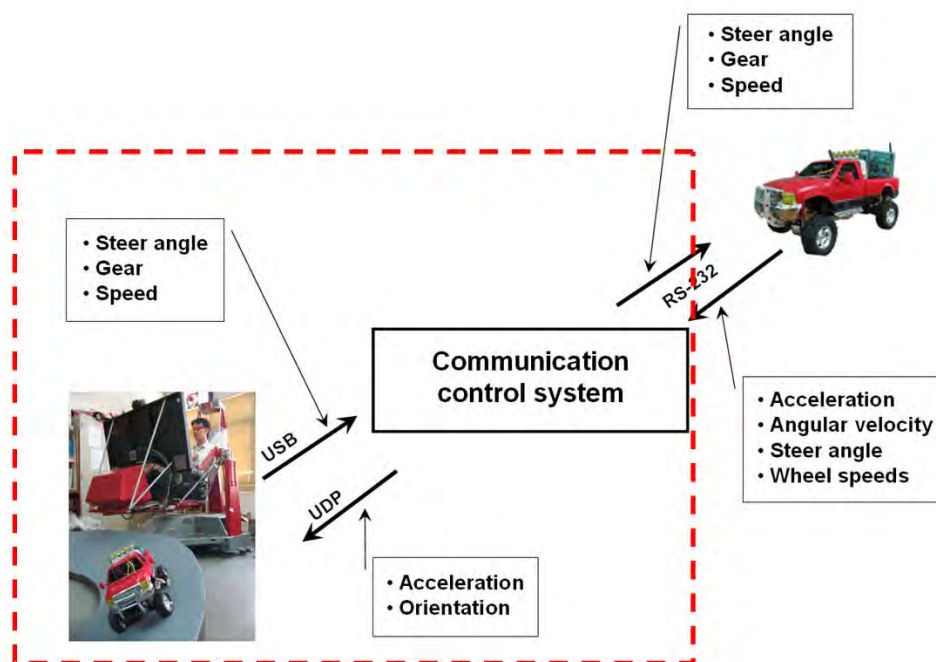
7.2.2 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ (System control computer) กับยานยนต์ย่อส่วน (Scaled vehicle)

7.2.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ (System control computer) กับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

การติดต่อสื่อสารในส่วนนี้ สามารถแบ่งหน้าที่การทำงานออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

7.2.1.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลจากเครื่องจำลองเสมือนจริง

7.2.1.2 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งข้อมูลให้เครื่องจำลองเสมือนจริง



รูปที่ 7.2 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับเครื่องจำลองเสมือนจริง

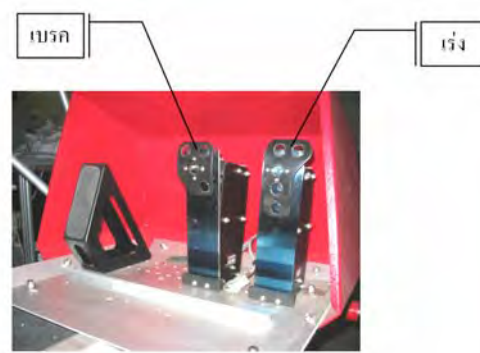
7.2.1.1 คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลจากเครื่องจำลองเสมือนจริง

เครื่องจำลองเสมือนจริงจะส่งข้อมูลที่รับมาจากผู้ควบคุม ซึ่งข้อมูลนั้นจะประกอบไปด้วยตำแหน่งพวงมาลัย , คันเร่ง , คันเบรก , เกียร์ โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งมาทางสัญญาณ USB (Universal Serial Bus) โดยค่าข้อมูลที่ได้รับจากพวงมาลัย จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 65535 , ค่าข้อมูลที่ได้รับจากคันเร่ง จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 150 , ค่าข้อมูลที่ได้รับจากคันเบรก จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 150 และ

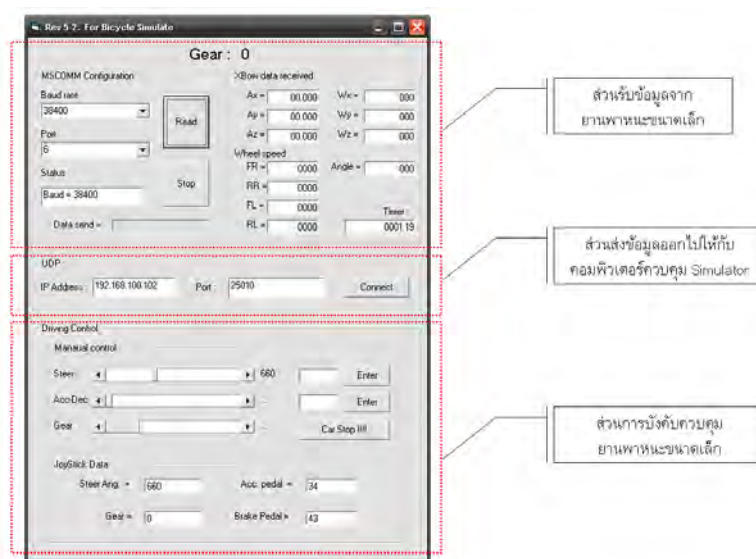
เกียร์ จะเป็นตัวเลข 0 ถึง 128 เมื่อระบบควบคุมได้รับข้อมูลเหล่านี้มาแล้ว จะต้องนำมาประมวลผลก่อน เพื่อเตรียมส่งข้อมูลไปให้ยานพาหนะย่อยส่วน

ตารางที่ 7.1 ความเร็วสูงสุดในการรับส่งข้อมูลของแต่ละระบบ

ระบบการรับ-ส่งข้อมูล	ความเร็วสูงสุดในการรับ-ส่งข้อมูล (Bits per seconds)
UDP	10,000,000
RF (RS-232)	250,000
USB	12,000,000



รูปที่ 7.3 พวงมาลัย, คันเร่ง, คันเบรก



รูปที่ 7.4 โปรแกรมควบคุมยานพาหนะย่อยส่วน

7.2.1.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งข้อมูลให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง

ระบบควบคุมในส่วนนี้จะเป็นการส่งข้อมูลผ่านทาง UDP ทั้งหมดซึ่งการรับ-ส่งแบบ UDP นี้จะไม่มีกลไกควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลที่เสถียรภาพ แต่มีข้อดีคือความสามารถในการติดต่อสื่อสารได้รวดเร็วกว่า การสื่อสารแบบ TCP (Transmission Control Protocol) เนื่องจาก TCP จะมีขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลอยู่ด้วย โดยคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบจะต้องส่งข้อมูลผ่านทาง UDP ให้กับ คอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง มีดังนี้

- Time
- Orientation 3 axis
- Acceleration 3 axis
- Velocity 3 axis
- Angular velocity 3 axis
- Position 3 axis
- ID

จากเดิมที่ทางผู้ผลิต Simulator (Force Dynamics) ได้เขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริงให้สามารถรับข้อมูลจากเกมส์ Live for speed ซึ่งเป็นเกมส์ที่สามารถส่งข้อมูลออกทาง UDP ได้ ดังนั้นทีมวิจัยจึงได้เริ่มศึกษาถึงกระบวนการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทาง UDP โดยเริ่มจากการเขียนโปรแกรมรับข้อมูลผ่านทาง UDP จากเกมส์ Live for speed ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 โปรแกรมรับข้อมูลจากเกมส์ Live for speed ผ่านทาง UDP

หลังจากที่ทีมวิจัยสามารถเขียนโปรแกรมรับข้อมูลจากเกมส์ Live for speed ผ่านทาง UDP ได้แล้ว จึงได้เขียนโปรแกรมส่งข้อมูลผ่านทาง UDP โดยลักษณะของข้อมูลที่จะส่งออกมาจะเป็นข้อมูลที่เป็นข้อมูลที่โปรแกรมควบคุม Simulator ต้องการ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม Simulator ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงรูปแบบการส่ง เนื่องจากโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (ถูกเขียนด้วยภาษาซี) รับข้อมูลในรูปแบบแพ็คเกจ (Package) (หรือที่เรียกในภาษาซี ว่า Structure, ภาษาวิซวล เบสิก เรียกว่า Type) และชนิดของตัวแปร มีดังนี้ (ภาษาวิซวล เบสิก)

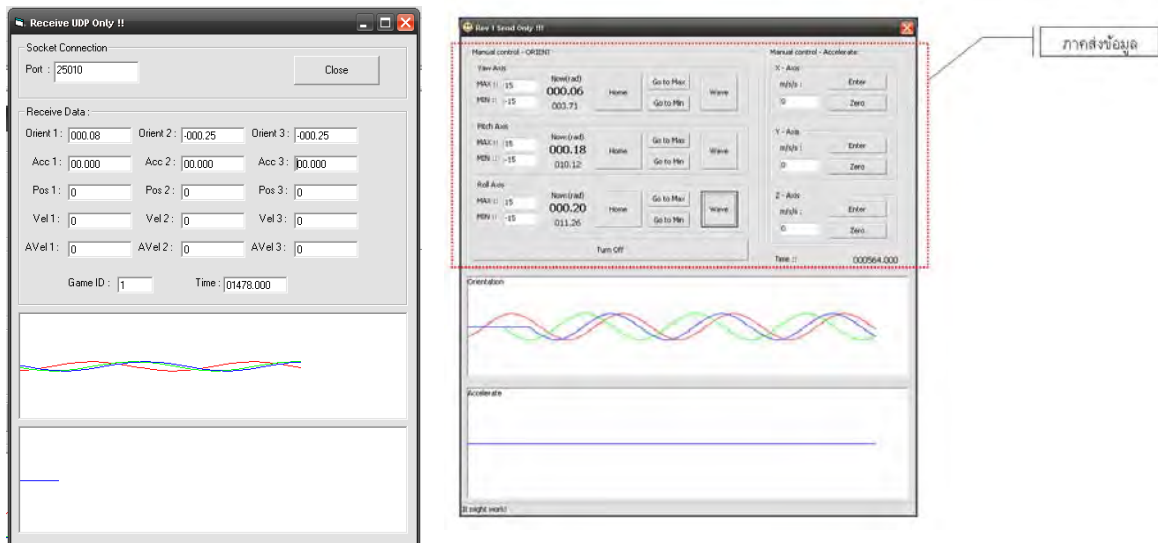
● Time		เป็นข้อมูลแบบ single	4	byte
● Orientation	3 axis	เป็นข้อมูลแบบ single	12	byte
● Acceleration	3 axis	เป็นข้อมูลแบบ single	12	byte
● Velocity	3 axis	เป็นข้อมูลแบบ single	12	byte
● Angular velocity	3 axis	เป็นข้อมูลแบบ single	12	byte
● Position	3 axis	เป็นข้อมูลแบบ Long	12	byte
● ID		เป็นข้อมูลแบบ Long	4	byte

โดยที่

- Single มีค่าตั้งแต่ ค่าบวกอยู่ระหว่าง $1.401298E-45$ ถึง $3.402823E38$ และค่าลบอยู่ระหว่าง $-3.402823E38$ ถึง $-1.401298E45$ มีขนาด 4 byte
- Long มีค่าตั้งแต่ $-2,147,483,648$ ถึง $2,147,483,647$ มีขนาด 4 byte



รูปที่ 7.6 ทดสอบการส่ง – รับข้อมูลผ่านทาง UDP

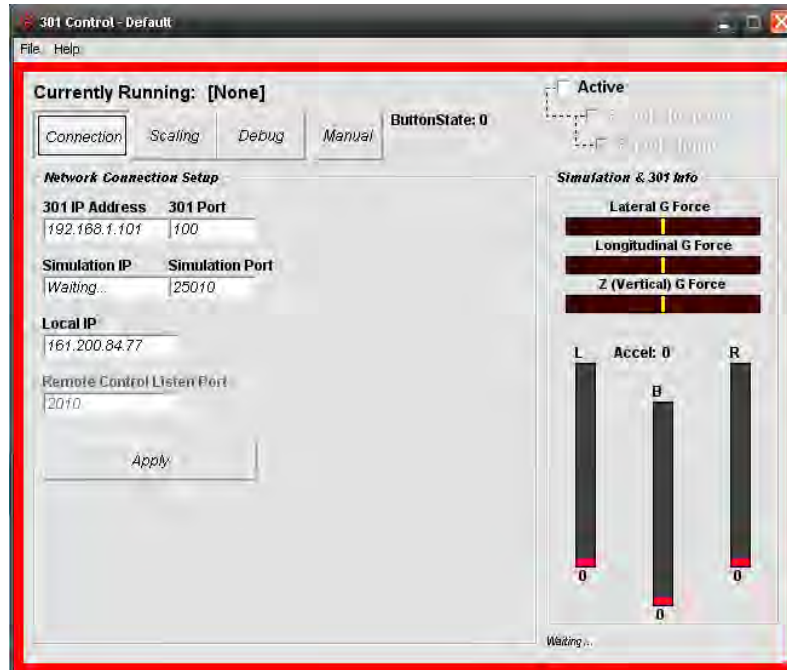


รูปที่ 7.7 โปรแกรมภาครับข้อมูล (ด้านซ้าย) ภาคส่งข้อมูล (ด้านขวา)

ในอันดับแรกก่อนจะเริ่มการติดต่อผ่านทาง UDP ระหว่างคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่องนั้น คอมพิวเตอร์ทั้งสองจะต้องมีหมายเลข IP อยู่ในกลุ่มเดียวกันก่อน ซึ่งในการทดสอบการรับส่งข้อมูลนี้ได้ใช้ หมายเลข IP 192.168.100.103 (สำหรับโปรแกรมภาคส่ง) และ IP 192.168.100.102 (สำหรับโปรแกรมภาครับ) และใช้ความถี่ 100 Hz ในการส่งข้อมูล เนื่องจากความเร็วของวีซวล เบสิค สามารถทำได้สูงสุดที่ 100 Hz

เมื่อที่มวิจัยสามารถเขียนโปรแกรมที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลทาง UDP ได้แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบไปให้กับคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง ซึ่งทางผู้ผลิต (Force dynamics) ได้ระบุถึงความถูกต้องของข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุม (Orientation) และความเร่งเชิงเส้น (Acceleration) เป็นพิเศษ เนื่องจากข้อมูลทั้งสองนี้จะนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) โดยตรง

โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) มีลักษณะดังรูป ซึ่งภายในตัวโปรแกรมนี้ สามารถกำหนดระดับการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ได้เช่น การตอบสนองแบบ 3 ระดับ Low , Medium , High และสามารถปรับค่า Chassis reference ได้ เป็นต้น



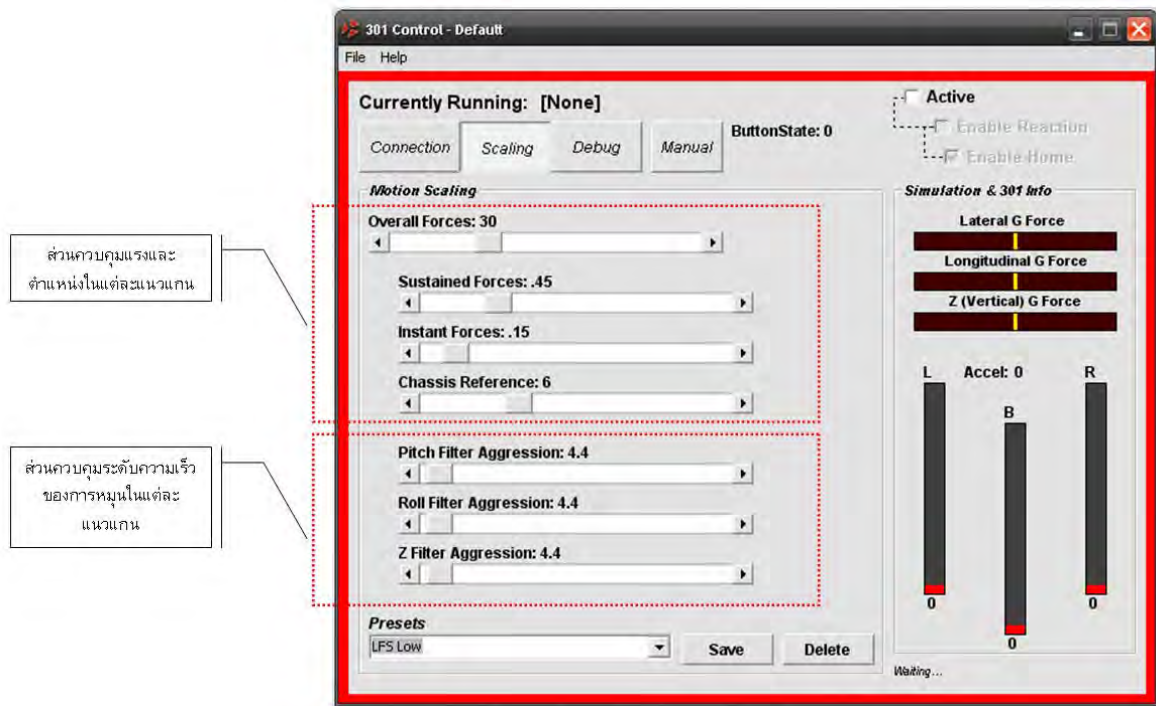
รูปที่ 7.8 โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)

การกำหนดระดับการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ในโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง นั้นจะอยู่ในส่วน Scaling โดยในส่วนนี้จะมีผลอย่างมากต่อขนาด และความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถของเครื่องจำลองเสมือนจริง ในการทำให้ผู้ควบคุมที่นั่งอยู่ภายในเครื่องจำลองเสมือนจริง เกิดความรู้สึกเสมือนจริงด้วย

จากการทดสอบโดยการส่งค่าการเคลื่อนที่เชิงมุม (Orientation) จากโปรแกรมภาคส่ง (คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ) ไปให้กับโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง (คอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง) แล้ววัดค่ามุมเอียงที่เกิดขึ้นของเครื่องจำลองเสมือนจริงโดยการส่งค่าการเคลื่อนที่เชิงมุม (Orientation) แบบคงที่ แต่มีการปรับค่าระดับ Scale และ Chassis Reference ของ โปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง พบว่า

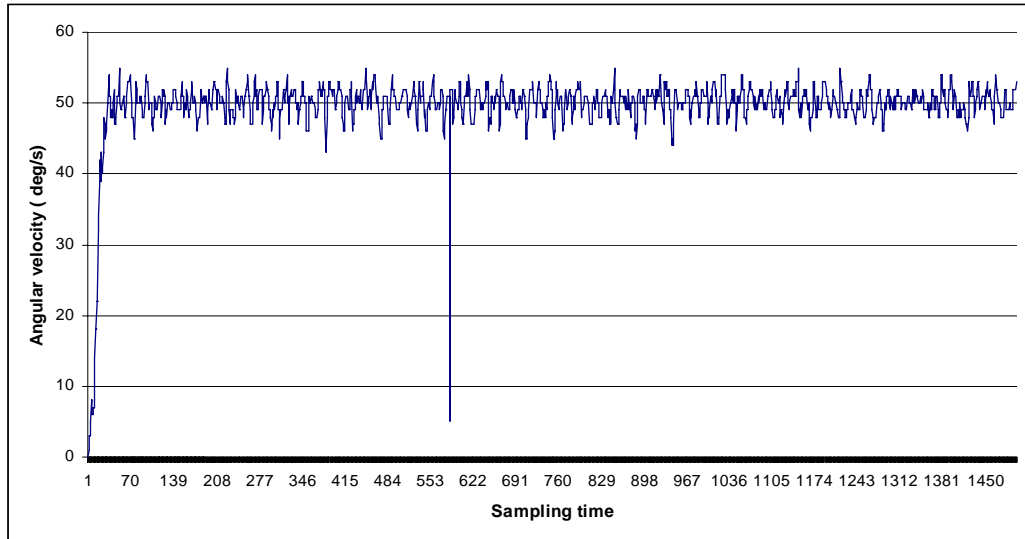
Orientation-Pitch angle (Command) = 15 degree

- Chassis Reference = 6 , Orientation – Pitch angle (Simulator) = 3 degree
- Chassis Reference = 10 , Orientation – Pitch angle (Simulator) = 6 degree
- Chassis Reference = 15 , Orientation – Pitch angle (Simulator) = 10 degree
- Chassis Reference = 20 , Orientation – Pitch angle (Simulator) = 14 degree



รูปที่ 7.9 กำหนด Scale เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง

ภายหลังจากที่โปรแกรมภาคส่ง (คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบ) สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง ได้แล้ว จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนของการส่งสัญญาณข้อมูลที่ได้รับมาจากยานพาหนะย่อยส่วน ไปให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง แต่เนื่องจากสัญญาณข้อมูลที่ได้รับมาจากคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบได้รับมาจากยานพาหนะย่อยส่วนนั้น เป็นสัญญาณที่ไม่ราบเรียบ เนื่องจากถ้าคอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณข้อมูลที่ไม่ราบเรียบให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริง เกิดการสั่นตามสัญญาณที่ได้รับ ดังนั้น จึงต้องนำสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบได้รับมาจากยานพาหนะย่อยส่วน นำมาผ่านตัวกรอง (Filter) เพื่อให้สัญญาณมีความราบเรียบมากขึ้น และต้องนำสัญญาณมาผ่านการบรรณการเพื่อป้องกันค่าสัญญาณที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ต้องการ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ควบคุมที่อยู่ภายในเครื่องจำลองเสมือนจริง ได้ถ้าเครื่องจำลองเสมือนจริง รับค่าสัญญาณนั้นไป และเมื่อผ่านการบรรณการทั้งสองนี้แล้วคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบจึงจะส่งข้อมูลไปให้กับเครื่องจำลองเสมือนจริง



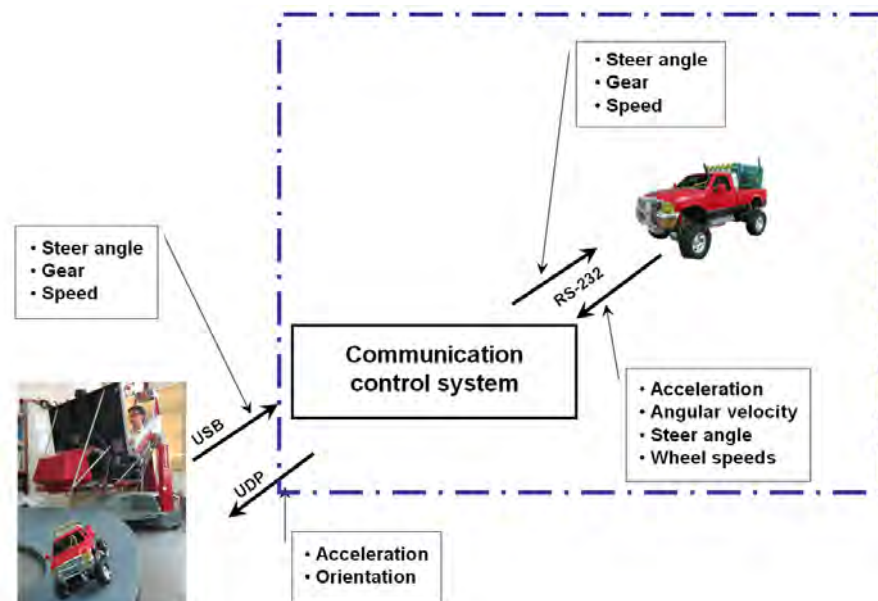
รูปที่ 7.10 สัญญาณที่ได้รับจากยานยนต์ย่อยส่วน



รูปที่ 7.11 กระบวนการกรองสัญญาณที่ได้รับจากยานยนต์ย่อยส่วน

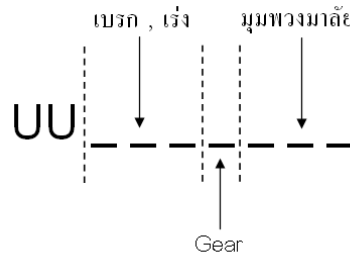
7.2.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับยานยนต์ย่อยส่วน

7.2.2.1. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งข้อมูลไปยังยานยนต์ย่อยส่วน



รูปที่ 7.12 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบกับยานยนต์ย่อยส่วน

หลังจากที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบได้รับข้อมูลมาจาก เครื่องจำลองเสมือนจริง ข้อมูลนี้ จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อเตรียมส่งไปให้กับยานพาหนะย่อยส่วน โดยข้อมูลที่ส่งออกจะ ประกอบด้วย ตำแหน่งการบังคับเลี้ยวล้อ , ความเร่ง , ความหน่วง และเกียร์ โดยจะมีตัวอักษร UU นำหน้าข้อมูลเพื่อเป็นตัวบ่งบอกถึงจุดเริ่มต้นของสัญญาณใหม่ จากนั้นจึงจะตามด้วยข้อมูลการ บังคับยานยนต์ย่อยส่วน

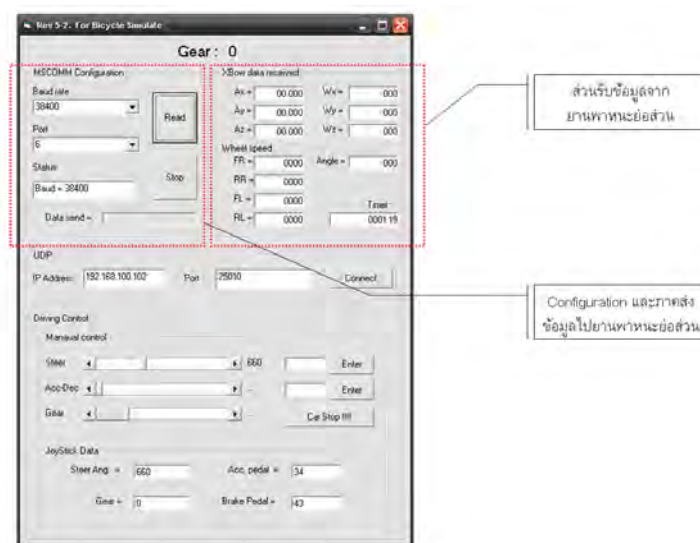


รูปที่ 7.13 ลักษณะข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบส่งไปให้กับยานยนต์ย่อยส่วน

7.2.2.2. คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลจากยานยนต์ย่อยส่วน

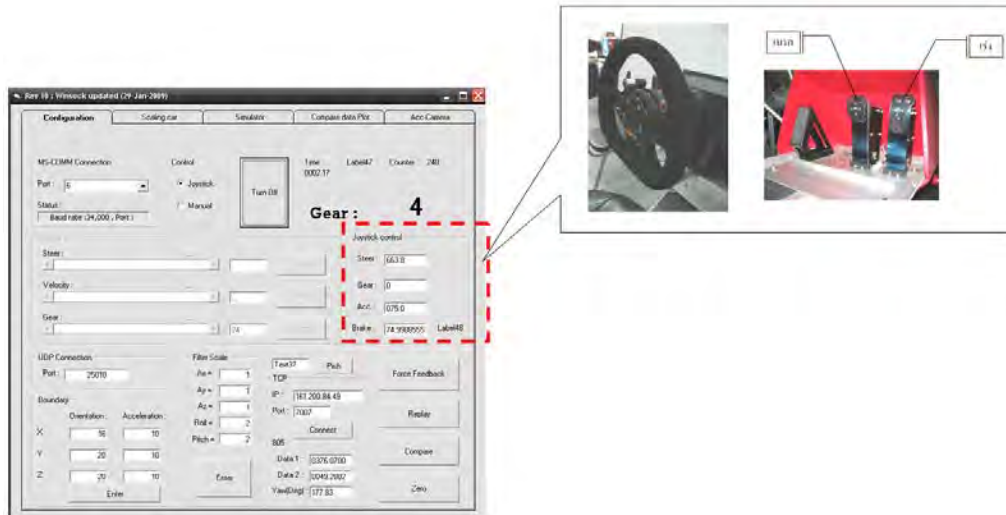
ข้อมูลที่ถูกส่งออกมาจากยานยนต์ย่อยส่วนนั้น มาจากข้อมูลที่อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ที่ถูกติดตั้งไว้ตามตำแหน่งต่างๆบนยานยนต์ย่อยส่วน ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นประกอบไปด้วย

- Acceleration (3 axis)
- Angular velocity (3 axis)
- Wheel speed (4 wheels)
- Steer angle

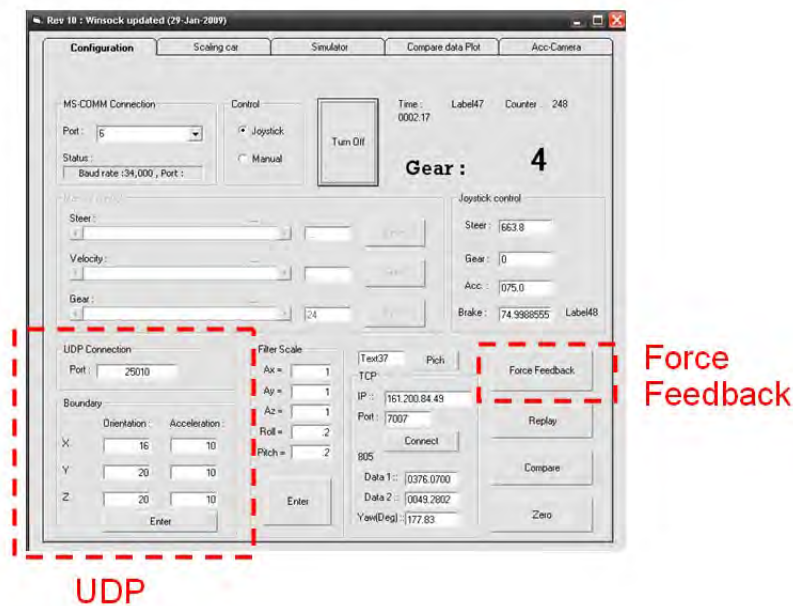


รูปที่ 7.14 โปรแกรมรับ - ส่ง ข้อมูลของยานยนต์ย่อยส่วน

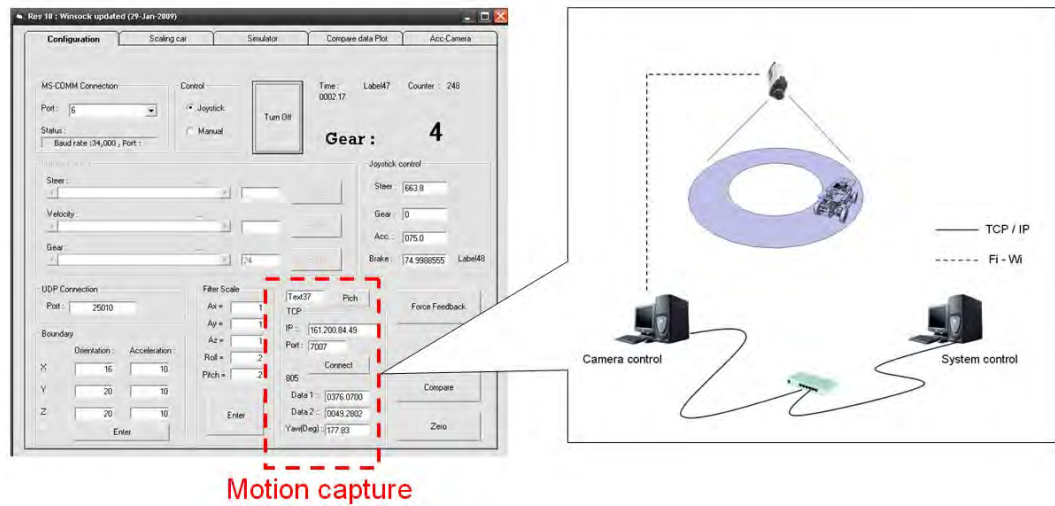
ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบได้รับนี้ มีความถี่เท่ากับ 100 Hz โดยเป็นการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน Wireless ซึ่งใช้ลักษณะของข้อมูลเป็นแบบ Binary ดังนั้นก่อนที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบจะส่งข้อมูลไปให้กับยานยนต์ย่อยส่วน จะต้องนำข้อมูลมาประมวลผลให้อยู่ในรูปของ Binary จึงจะสามารถส่งข้อมูลสื่อสารกับยานยนต์ย่อยส่วนได้ ในทำนองเดียวกัน เมื่อคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบรับข้อมูลมาจากยานยนต์ย่อยส่วน ข้อมูลที่ได้รับนี้จะอยู่ในรูปของ Binary ดังนั้นก่อนที่คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบจะนำไปใช้งาน จะต้องนำข้อมูลมาประมวลผลก่อน



รูปที่ 7.15 ส่วนแสดงข้อมูลที่ได้รับพวงมาลัย คันเร่ง และเบรก บนเครื่องจำลองเสมือนจริงของโปรแกรมควบคุมระบบ



รูปที่ 7.16 ส่วนแสดงการส่งข้อมูลทาง UDP และการกำหนดแรงป้อนกลับของพวงมาลัยบน เครื่องจำลองเสมือนจริง



Motion capture

รูปที่ 7.17 ส่วนแสดงข้อมูลที่ได้รับจากกล้องจับภาพ ของโปรแกรมควบคุมระบบ

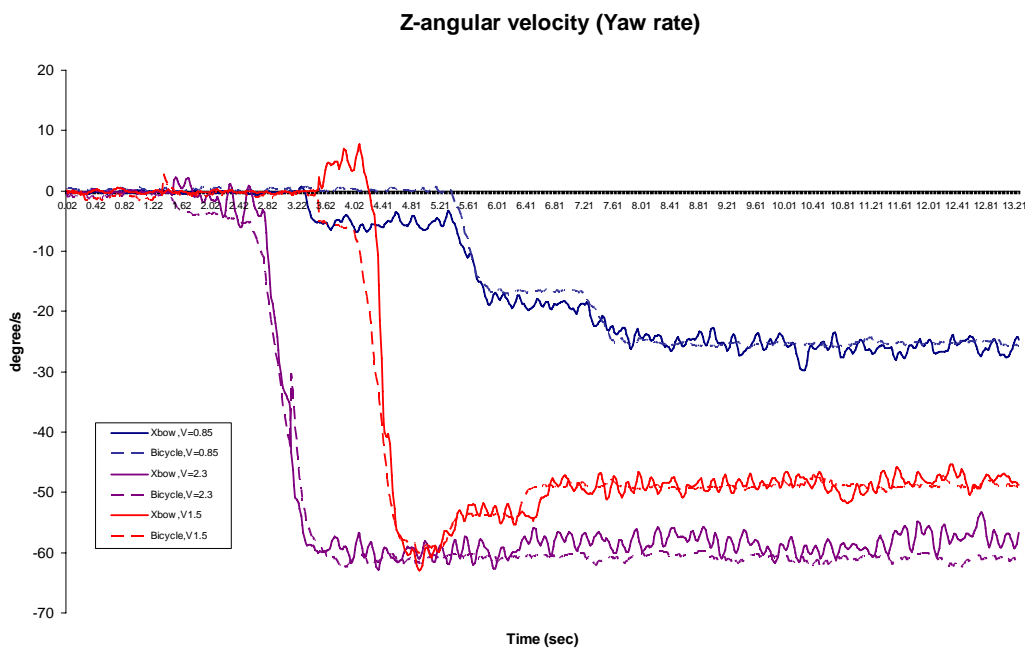
บทที่ 8

การทดสอบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

การทดสอบเก็บข้อมูลนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักด้วยกัน ประกอบด้วย ส่วนที่หนึ่งคือการเปรียบเทียบข้อมูลสถานะของยานยนต์ย่อยส่วน (Vehicle states) ระหว่างข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อยส่วนกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ โดยในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ยานยนต์ (Bicycle model) และส่วนที่สองคือการทดสอบความสามารถในการสร้างความเสมือนจริงของระบบควบคุมระหว่างระบบควบคุมที่มีตัวกรองเสมือนจริง กับระบบควบคุมที่ไม่มีตัวกรองเสมือนจริง

8.1 การเปรียบเทียบข้อมูลสถานะของยานยนต์ย่อยส่วน

การทดสอบเก็บข้อมูลในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ยานยนต์ (Bicycle model) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อยส่วน (Xbow) โดยจากผลการทดสอบ [20] ได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ระหว่าง ค่าพลศาสตร์ยานยนต์ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งติดตั้งอยู่บนยานยนต์ย่อยส่วน กับค่าพลศาสตร์ยานยนต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง 2 มิติ (Bicycle model) พบว่าค่าทั้งสองจะใกล้เคียงกันดี ที่ค่ามุมลื่นไถล (Slip angle) น้อยกว่า 5 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z แบบขับวนเป็นวงกลม (small slip angle), [20]

ตารางที่ 8.1 ข้อมูลความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z ของยานยนต์ยี่ห้อส่วนแบบขับทดสอบบนเป็นวงกลม (small slip angle), [20]

ระดับความเร็ว	Sensor (deg/s)	Bicycle (deg/s)	error (%)
0.85	-26.15	-25.35	3.1
1.5	-48.4	-48.8	0.1
2.3	-57.57	-60.96	5.9

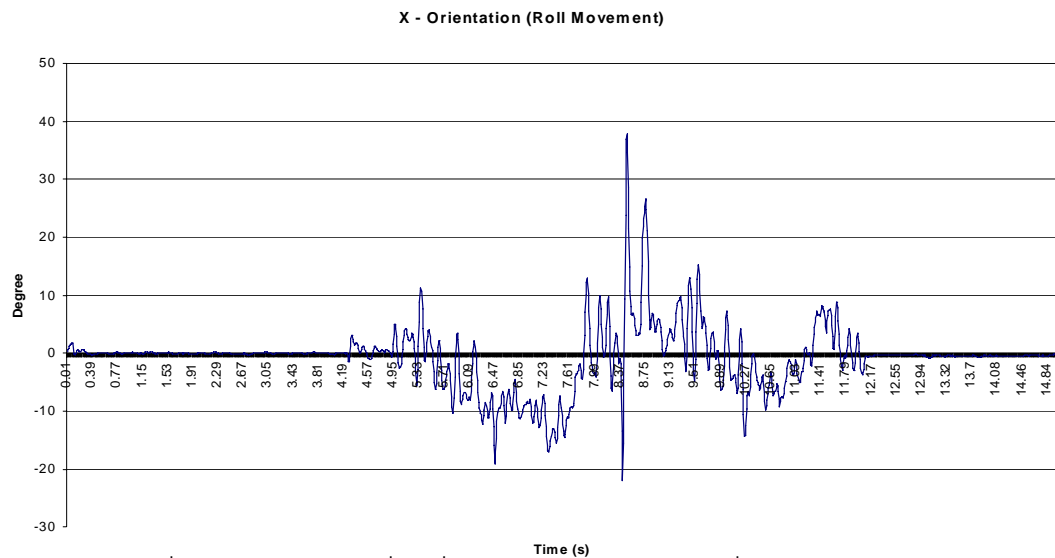
8.2 เปรียบเทียบการทำงานระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงที่มีตัวกรองเสมือนจริงกับระบบควบคุมที่ไม่มีตัวกรองเสมือนจริง

การทดสอบเก็บข้อมูลนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆของยานยนต์ยี่ห้อส่วน ซึ่งได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ต่างๆ สามารถตรวจวัดได้ โดยจะพิจารณาข้อมูลความเร็วเชิงเส้นทั้ง 3 แนวแกน และความเร็วเชิงมุมรอบแกน x และ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน y เป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นข้อมูลที่จะต้องนำมาใช้ในการประมวลผลด้วยกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง เพื่อส่งข้อมูลไปให้แก่เครื่องจำลองเสมือนจริง เพื่อจำลองความเสมือนจริงกับมนุษย์ที่กำลังควบคุมอยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง

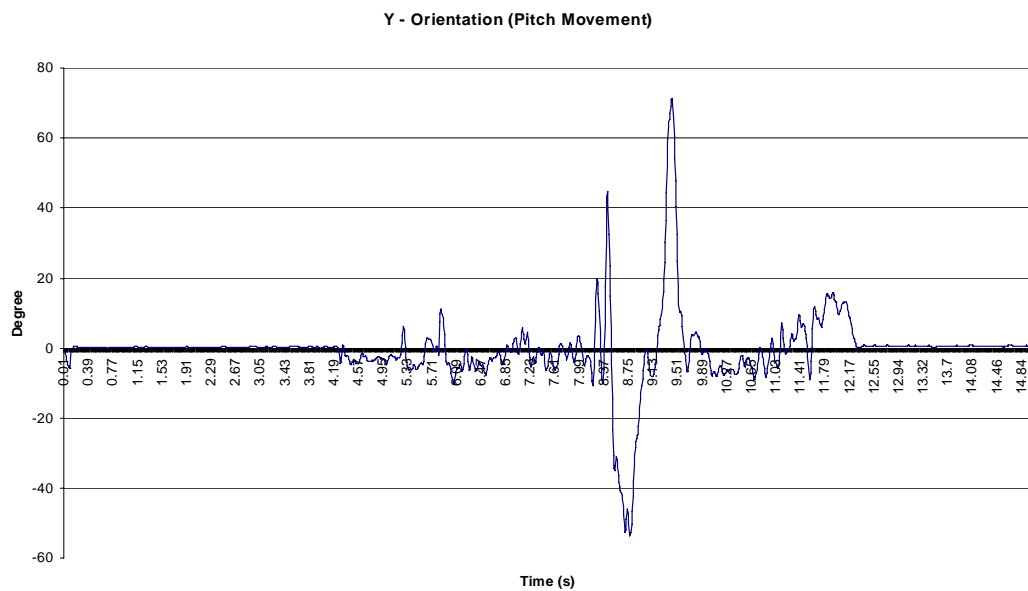


รูปที่ 8.2 สนามทดสอบ

ภายหลังจากการทดสอบโดยการควบคุมยานพาหนะย่อยส่วนวิ่งรอบสนามทดสอบจำลอง 1 รอบ โดยใช้ความเร็วของยานพาหนะย่อยส่วนในช่วงเกียร์ 1 ซึ่งความเร็วจะอยู่ในช่วง 0-4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ โดยได้นำข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) มาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) ดังรูป



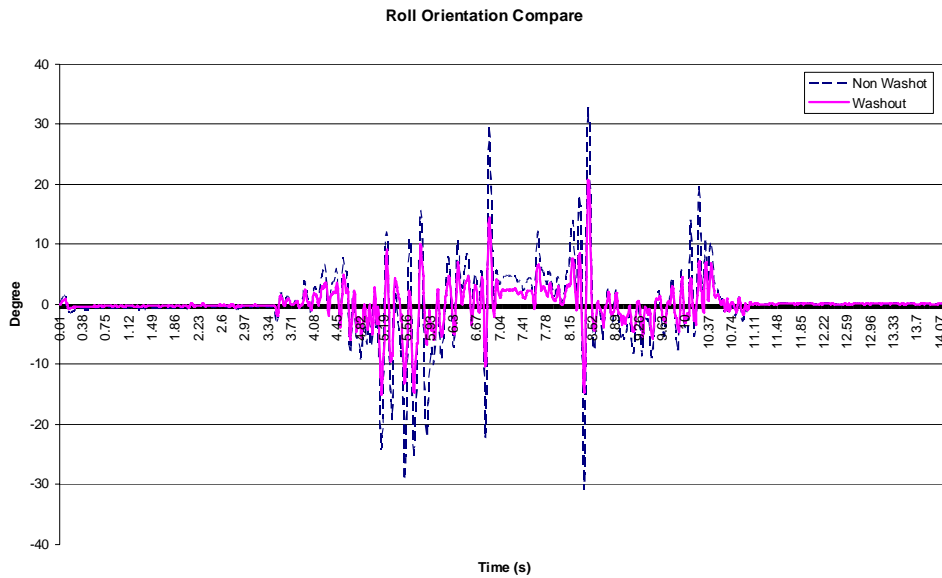
รูปที่ 8.3 ข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X ของเครื่องจำลองเสมือนจริง



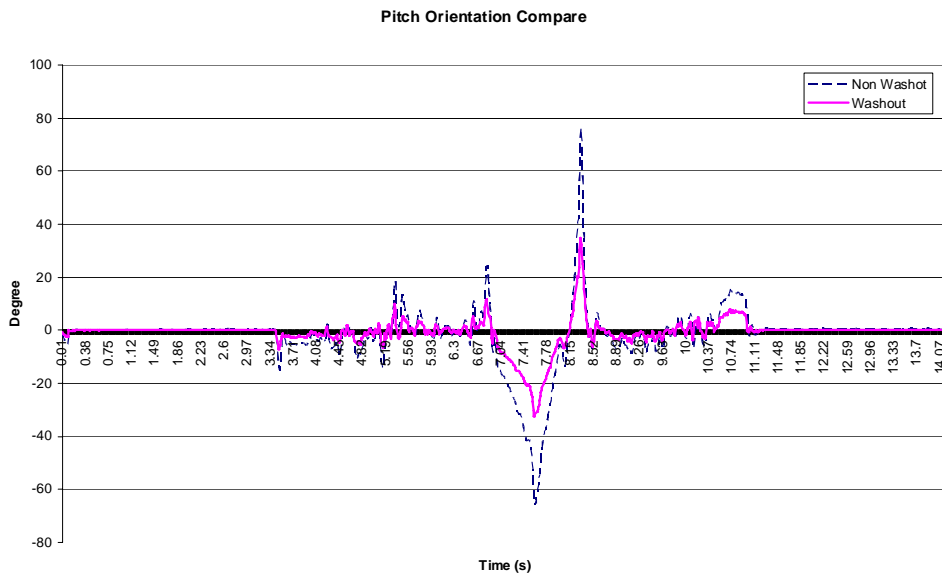
รูปที่ 8.4 ข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ของเครื่องจำลองเสมือนจริง

จากรูปที่ 8.4 พบว่าในช่วงที่ยานพาหนะย่อยส่วนเคลื่อนที่ขึ้นเนินต่างระดับ ค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y อยู่ในช่วง 70 ถึง -50 องศา ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมที่สูง เนื่องจากเครื่องจำลองเสมือนจริง รับข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ได้จำลองการเคลื่อนที่เชิงมุมซึ่ง

เกิดจากในขณะที่ยานพาหนะย่อยส่วนกำลังขึ้นเนินเอียง รวมกับ ข้อมูลความเร่งเชิงเส้นในแกน X ที่เครื่องจำลองเสมือนจริง ได้รับเข้ามา ซึ่ง เครื่องจำลองเสมือนจริงได้จำลองความเร่งเชิงเส้นโดยการเอียง ทำให้มุมที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากกว่าปกติ



รูปที่ 8.5 เปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X ของเครื่องจำลองเสมือนจริง



รูปที่ 8.6 เปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y ของเครื่องจำลองเสมือนจริง

ต่อจากนั้นทางคณะวิจัยได้ทำการทดสอบอีกครั้ง โดยข้อมูลสามารถตรวจวัดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด จะถูกนำมาผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง โดยได้ทำการคำนวณการเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งหมดที่เครื่องจำลองเสมือนจริงจะต้องแสดงผล นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ไม่ได้

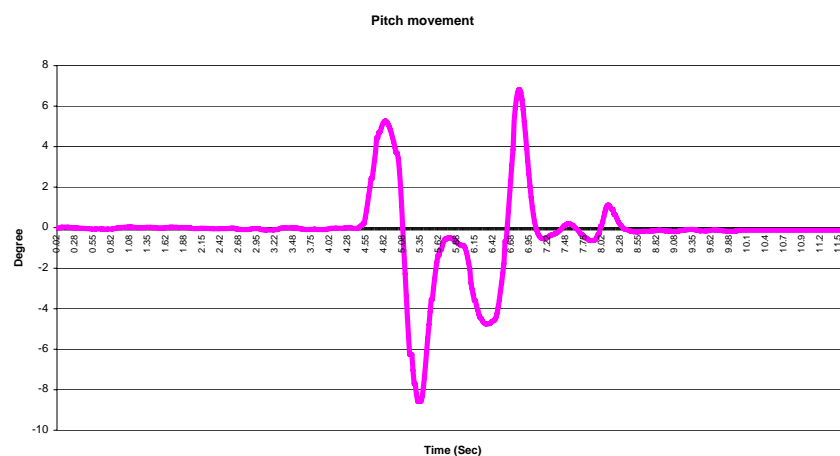
ผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง ซึ่งผลที่ได้พบว่าการเคลื่อนที่เชิงมุมจากทั้งสองแบบมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่เชิงมุมที่ได้จากการจำลองความเร่งเชิงเส้นซึ่งผ่านกระบวนการจำกัดความเร็ว (Rate Limit) ทำให้มุมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้มนุษย์สามารถถึงความเร่งเชิงเส้นได้โดยที่ไม่ได้รับรู้ว่ากำลังเคลื่อนที่เชิงมุมอยู่ ณ ขณะนั้น

จากรูปที่ 8.6 จะพบว่าการเคลื่อนที่เชิงมุมของทั้งสองแบบความแตกต่างกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อมูลที่ผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง จะมีค่าต่ำกว่าการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง โดยช่วงค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง จะอยู่ในช่วง 30 ถึง -30 องศา ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปร่างของสนามทดสอบในช่วงเนินต่างระดับ ในขณะที่การเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง ค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมอยู่ในช่วง 70 ถึง -70 องศา ซึ่งถือได้ว่าแตกต่างไปจากรูปร่างของสนามทดสอบในช่วงเนินต่างระดับ

จากผลการทดสอบในขั้นต้นนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่าระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบมีตัวกรองเสมือนจริง นั้นสามารถจำลองความเสมือนจริงได้ดีกว่าระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบไม่มีตัวกรองเสมือนจริง เพราะจากข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า การเคลื่อนที่เชิงมุมของระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบมีตัวกรองเสมือนจริง นั้นมีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงของสนามมากกว่าระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบไม่มีตัวกรองเสมือนจริง



รูปที่ 8.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ย่อยส่วนบนรางเลื่อน



รูปที่ 8.8 การเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริงในช่วงที่ยานยนต์ย่อยส่วนเริ่มเคลื่อนที่

แต่ทั้งนี้ก็ยังมีความรู้สึกไม่เหมือนจริงของผู้ขับที่ที่อยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง ในช่วงการขับออกตัวจากจุดหยุดนิ่ง เนื่องจากข้อมูลความการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้นมีค่ามากกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 8.8 ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการคำนวณค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น ได้นำเอาตัวแปรความเร่งเชิงเส้นเข้ามาคำนวณด้วย โดยความเร่งเชิงเส้นนี้เอง ที่ทำให้เกิดการคำนวณที่ยังมีความผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Xbow) ที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อบส่วนนั้นสามารถตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นรวมระหว่างความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่กับความเร่งที่เกิดจากการเอียง ซึ่งในขั้นตอนของการคำนวณหามุมการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น ค่าความเร่งเชิงเส้นที่ต้องการนั้นต้องการเพียงความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเอียง ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการติดตั้งกล่องบนเพดานของอาคารเพื่อตรวจจับความเร่งเชิงเส้นของยานยนต์ย่อบส่วน เพราะค่าความเร่งที่ได้นี้จะนำไปหักล้างกับความเร่งเชิงเส้นรวมที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด (Xbow) บนยานยนต์ย่อบส่วน

ดังนั้นจึงได้กำหนดการทดสอบขึ้นโดยจับยึดยานยนต์ย่อบส่วนเข้ากับรางเลื่อน (Linear slide) เพื่อป้องกันการโคลงตัวของยานยนต์ย่อบส่วน จากนั้นจึงทำการเลื่อนยานยนต์ย่อบส่วนไป-มา เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมของยานยนต์ย่อบส่วนภายหลังจากใช้กล่องตรวจจับความเร่ง

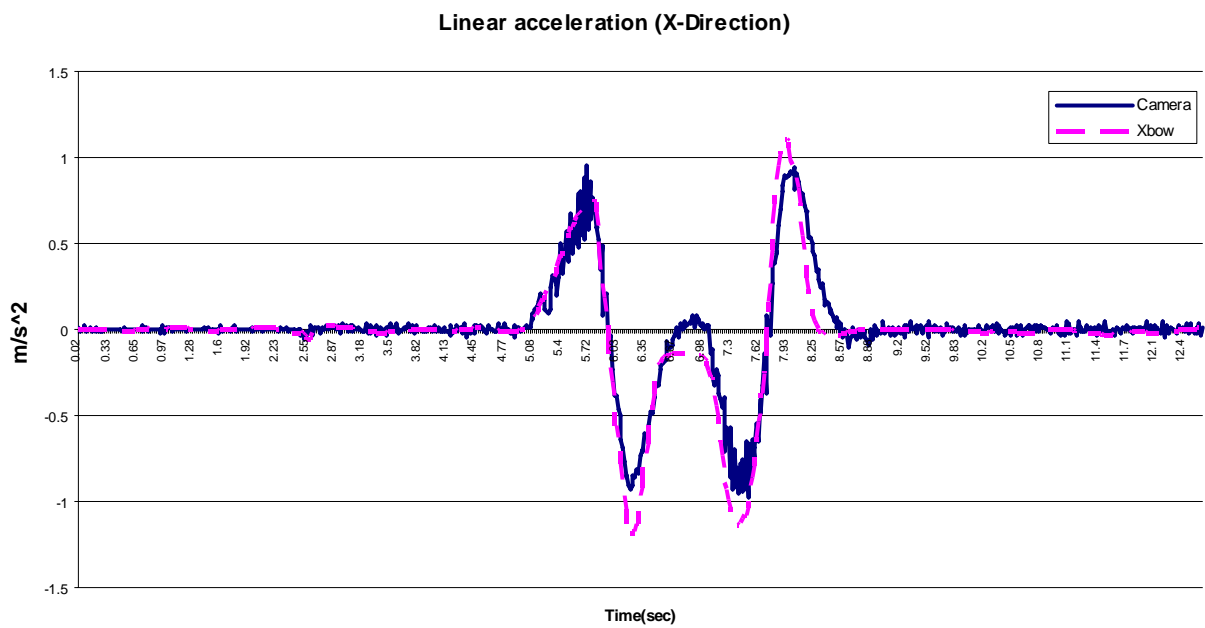
8.3 การทดสอบความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จากกล่องที่ติดตั้งจากมุมสูง

ความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จากกล่องมุมสูงนั้นสามารถตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่เท่านั้น โดยผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงเส้นระหว่างค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อบส่วน (Xbow) กับ ความเร่งที่ตรวจวัดได้จากกล่องมุมสูง แต่เนื่องจากในขณะที่มีการเคลื่อนที่นั้นยานยนต์ย่อบส่วนอาจเกิดการโคลง (เอียงหน้า-หลัง) ได้ ซึ่งอาการเอียงนี้จะส่งผลต่อความเร่งที่อุปกรณ์บนยานยนต์ย่อบส่วนตรวจวัดได้ และทำให้เกิดค่าผิดพลาด (error) ได้ เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งยานยนต์ย่อบส่วนตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นรวมระหว่างความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่กับความเร่งที่เกิดจากการเอียง

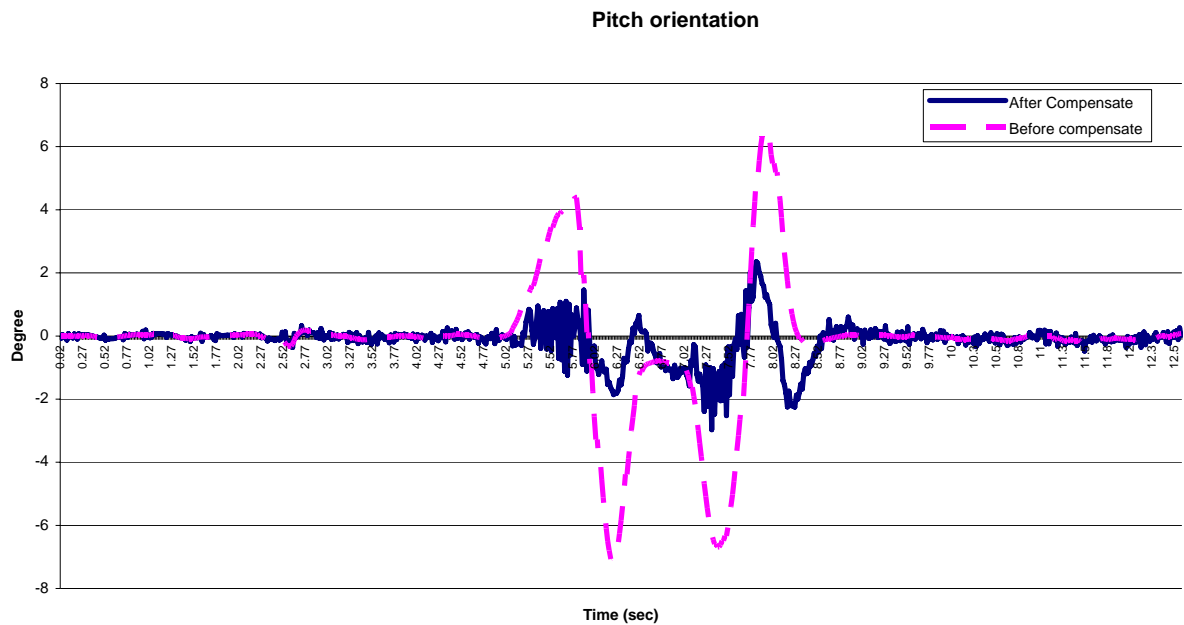
ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ถอดล้อของยานยนต์ย่อบส่วนออกเพื่อป้องกันการโคลงตัวเนื่องจากการยุบตัวของล้อ รวมถึงได้จับยึดยานยนต์ย่อบส่วนเข้ากับรางเลื่อนอย่างแน่นหนา ดังที่แสดงในรูปที่ 8.30 จากนั้นจึงนำยานยนต์ย่อบส่วนไปทดสอบโดย เลื่อนเข้า-ออก เพื่อจำลองสภาวะที่ยานยนต์ย่อบส่วนเริ่มเคลื่อนที่ และช่วงเบรก โดยในขณะที่ทดสอบ ได้ใช้กล่องจากมุมสูงตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อบส่วน (Xbow) ดังรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 การจับยึดยานยนต์ย่อยส่วนเข้ากับรางเลื่อน



รูปที่ 8.10 ความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จาก อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อยส่วน (Xbow) กับกล้อง
มุมมอง



รูปที่ 8.11 ความเร่งเชิงเส้นที่ตรวจวัดได้จาก อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อยส่วน (Xbow) กับกล้องมุมสูง

จากผลการทดสอบในรูปที่ 8.11 จะเห็นได้ว่ามุมการเคลื่อนที่รอบแกน Y (Pitch orientation) ของข้อมูลที่ได้จากระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบมีตัวกรองเสมือนจริง มีขนาดมุมอยู่ในช่วงระหว่าง -2 ถึง 2 องศา ซึ่งน้อยกว่าระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง แบบไม่มี ตัวกรองเสมือนจริง ที่มีขนาดมุมอยู่ในช่วง -7 ถึง 7 องศา โดยข้อมูลที่ได้จากระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบมีตัวกรองเสมือนจริง นั้นมีความสอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากในขณะที่ทดสอบนั้น ยานยนต์ย่อยส่วนได้ถูกจับยึดอยู่รางเลื่อน ซึ่งไม่สามารถเกิดอาการโคลง หรือเอียงได้

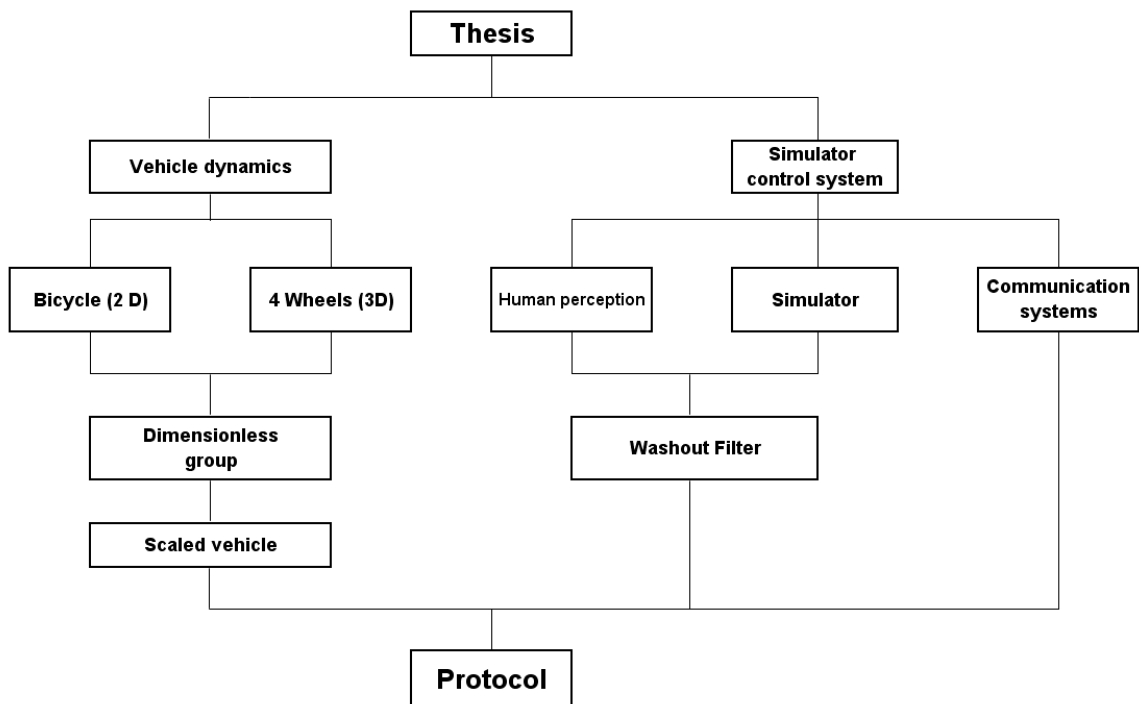
บทที่ 9

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาทฤษฎีที่จะนำไปใช้ในการจำลองพลศาสตร์เพื่อให้ยานยนต์ย่อบส่วนมีการตอบสนองต่อการควบคุมเสมือนกับการควบคุมยานยนต์จริง และศึกษาการรับรู้ของมนุษย์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เพื่อให้สามารถจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ย่อบส่วนเสมือนว่าผู้ควบคุมกำลังควบคุมอยู่ในยานยนต์จริง

ผู้วิจัยได้เขียนโครงสร้างของงานวิจัย โดยแสดงเป็นลำดับชั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 9.1 จากการศึกษาหัวข้อต่างๆที่เกี่ยวกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติและ 3 มิติ, การวิเคราะห์และจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ, ระบบการรับรู้ของมนุษย์ รวมถึงการสร้างระบบติดต่อสื่อสารโดยรวมของระบบ ซึ่งระบบนี้จะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างยานยนต์ย่อบส่วนและเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator)



รูปที่ 9.1 โครงสร้างลำดับหัวข้อของงานวิจัย

9.1.1 สรุปผลการวิจัยในส่วนของหัวข้อพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle dynamics)

9.1.1.1 พลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model)

เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model) เป็นการคำนวณภายใต้เงื่อนไขที่ยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วคงที่, ไม่คำนึงถึงการหมุนของยานยนต์รอบแกน X, Y ทำให้มีตัวแปรอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 3 ตัวแปร คือ การหมุนรอบแกน z (Yaw) , การเคลื่อนที่ในระนาบ (x, y) และอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าแรงที่เกิดขึ้นระหว่างด้านซ้ายและขวามีความสมมาตรกัน จึงทำให้สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นล้อเดียวกันได้ ทำให้มีความง่ายขึ้นต่อการคำนวณ รวมถึงการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นด้านข้างล้อแบบเชิงเส้น (linear) แต่ทว่าเพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้นี้ ค่าความเร่งของยานยนต์ควรน้อยกว่า 0.3 g

9.1.1.2 พลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four wheels model)

สำหรับการคำนวณในแบบนี้ จะพิจารณาในขณะที่ยานยนต์กำลังวิ่งด้วยความเร็วคงที่ และมีความแตกต่างจากแบบพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model) คือ การรวมเอาการหมุนรอบแนวแกน x (Roll movement) และการหมุนรอบแกน y (Pitch movement) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นมีจำนวนของตัวแปรอิสระเท่ากับ 6 ตัวแปร นั่นคือเราสามารถที่จะคำนวณหาการเคลื่อนที่ของรถได้ทั้งในระนาบและแนวตั้ง หรือ 3 มิติ โดยในการคำนวณนี้พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นด้านข้างล้อเป็นแบบเชิงเส้น เหมือนกับแบบ Bicycle model

9.1.1.3 การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group)

จากทฤษฎีของพาย ทำให้เราสามารถที่สร้างรถจำลองที่มีการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับรถจริง โดยจากสมการพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model) เราสามารถที่จะจัดกลุ่มของ

พายได้เท่ากับ $\Pi_1 = \frac{a}{L}$ $\Pi_2 = \frac{b}{L}$, $\Pi_3 = \frac{C_{cf}L}{\mu u^2}$, $\Pi_4 = \frac{C_{cr}L}{\mu u^2}$, $\Pi_5 = \frac{I_z}{mL^2}$ และจากสมการ

พลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (Four wheels model) สามารถจัดกลุ่มของพายได้เท่ากับ $\Pi_1 = \frac{M_w}{M}$,

$\Pi_2 = \frac{a}{L}$, $\Pi_3 = \frac{b}{L}$, $\Pi_4 = \frac{K_T L^2}{\mu u^2}$, $\Pi_5 = \frac{K_{sr} L^2}{\mu u^2}$, $\Pi_6 = \frac{K_{sf} L^2}{\mu u^2}$, $\Pi_7 = \frac{C_{sf} L}{\mu u}$, $\Pi_8 = \frac{C_{sr} L}{\mu u}$,

$\Pi_9 = \frac{W}{L}$, $\Pi_{10} = \frac{c}{L}$, $\Pi_{11} = \frac{C_f L}{\mu u^2}$, $\Pi_{12} = \frac{C_r L}{\mu u^2}$, $\Pi_{13} = \frac{I_z}{ML^2}$, $\Pi_{14} = \frac{I_y}{ML^2}$, $\Pi_{15} = \frac{I_x}{ML^2}$

จากผลการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อเปรียบเทียบค่าสถานะของยานยนต์ระหว่างยานยนต์ต้นแบบ (Prototype vehicle) และยานยนต์ย่อส่วน (Scaled vehicle) พบว่า มีลักษณะการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้

การตอบสนองการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular response)

ในที่นี้หมายถึงการเคลื่อนที่เชิงมุมทั้ง 3 แนวแกน (x,y,z) ได้แก่ ความเร่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม และการเคลื่อนที่เชิงมุมด้วย เนื่องจากค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น เป็นตัวแปรที่ไร้มิติ อยู่แล้ว โดยจากการเปรียบเทียบค่าสถานะของยานยนต์ระหว่างยานยนต์ต้นแบบ (Prototype vehicle) และยานยนต์ย่อส่วน (Scaled vehicle) จากการคำนวณด้วยพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ (Bicycle model) และพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ (Four wheels model) พบว่ามีกรตอบสนองลักษณะคล้ายกัน และมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

การตอบสนองการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear response)

ในที่นี้หมายถึงการเคลื่อนที่เชิงเส้นต่างๆ ใน 3 แนวแกน (x,y,z) ได้แก่ ความเร่งเชิงเส้น ความเร็วเชิงเส้น และการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยเนื่องจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นนี้จะเกี่ยวข้องกับตัวแปรระยะทางเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีมิติ ดังนั้นทำให้ค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกันระหว่างค่าสถานะของยานยนต์ต้นแบบ (Prototype vehicle) และค่าสถานะของยานยนต์ย่อส่วน (Scaled vehicle) โดยจากการคำนวณพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การกำหนดอัตราส่วน (Scale) เท่ากับ 1:5 โดยผลที่ได้จากการคำนวณด้วยพลศาสตร์ยานยนต์ 2 มิติ และ 3 มิติ นั้นเราจะพบได้ว่าค่าสถานะของยานยนต์ย่อส่วนนั้นจะมีขนาดลดลงมาเป็นอัตราส่วน 1:5 ด้วยเช่นกัน โดยสาเหตุที่นั้นเกิดจากภายหลังจากการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ จะมีผลทำให้ค่าเวลาของยานยนต์ต้นแบบกับยานยนต์ย่อส่วนนั้นมีค่าเท่ากัน ทำให้ตัวแปรระยะทางมีขนาดที่ลดลงมาเท่ากับขนาดย่อส่วน (1 : 5)

9.1.1.4 สรุบบระบบการรับรู้ของมนุษย์

ปัจจัยสำคัญในระบบการรับรู้ของมนุษย์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องจำลองเสมือนจริง (simulator) คือระบบการทรงตัว (Equilibrium system) ซึ่งประกอบไปด้วย

9.1.1.4.1 ระบบตา (vision system)

หน้าที่สำคัญคือการมองเห็นภาพ สภาวะแวดล้อมภายนอก จากข้อมูลพบว่าความสามารถในการรับความถี่ของแสงที่ส่งเข้ามาที่ตา (fusion frequency) นั้นมีผลกับความต่อเนื่องของภาพที่มนุษย์มองเห็น ซึ่งขีดจำกัดของความถี่ของแสงที่ส่งเข้ามาที่ตาแล้วจะทำให้เราสามารถ

มองเห็นภาพแบบต่อเนื่องนี้ ถ้ากรณีที่เรายู่ในที่มืดจะต้องใช้ความถี่ที่มากกว่า 10 ครั้งต่อวินาที และกรณีที่เรายู่ในที่ที่มีแสงสว่างจะต้องใช้ความถี่ถึง 60 ครั้งต่อวินาที โดยเราสามารถนำข้อมูลนี้มาใช้ในการรับ - ส่งภาพของ simulator ได้

9.1.1.4.2 ระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular)

หน้าที่สำคัญคือการรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นกับร่างกายมนุษย์ โดยระบบรับรู้ของหูชั้นใน (Vestibular) ประกอบด้วยเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) กับออตolith (Otolith) เมื่อมนุษย์ถูกกระตุ้นเกิดการหมุนจะทำให้มนุษย์รับรู้ถึงความเร่งเชิงมุมได้จากเซมิเซอร์คิวลาร์ คาแนล (Semicircular canal) และเมื่อมนุษย์ถูกกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ มนุษย์จะสามารถรับรู้ถึงความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นนี้ได้จากออตolith (Otolith) ซึ่งออตolith (Otolith) จะสามารถรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลกด้วย โดยลักษณะการรับรู้ของออตolith (Otolith) จะเป็นผลรวมของความเร่งระหว่างความเร่งเชิงเส้นเนื่องจากการเคลื่อนที่กับความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก เรียกว่ากราวิตอนเนอร์เซียล ฟอर्स (Gravito-inertial force)

โดยในการจำลองความเร่งที่เกิดขึ้นกับมนุษย์นั้น เราสามารถที่จะจำลองความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ได้จากหลักการของกราวิตอนเนอร์เซียล ฟอर्स (Gravito-inertial force) โดยการเอียงศีรษะของมนุษย์ เช่น เราสามารถจำลองความเร่งขณะที่เราเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ได้โดยการเอียงตัวไปด้านหลัง รวมถึงการจำลองความเร่งที่เกิดขึ้นขณะที่ขับรถเข้าโค้งได้โดยการเอียงตัวด้วยเช่นกัน ซึ่งในขณะที่ยาลองความเร่งโดยการเอียงนี้ สิ่งที่สำคัญคือความเร็วของการหมุนเก้อเพื่อใช้ในการเอียงตัว ซึ่งจะต้องหมุนด้วยความเร็วต่ำเพื่อไม่ให้มนุษย์รับรู้ที่กำลังถูกหมุนอยู่ โดยเราเรียกค่าต่ำสุดของกระตุ้นที่ทำให้มนุษย์สามารถรับรู้ได้ว่าเธสโธลด์ (Threshold) ดังนั้นเราจึงนำค่า threshold นี้มาเป็นตัวแปรในการออกแบบระบบควบคุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) เพื่อจำลองความเร่งที่เกิดขึ้นให้เสมือนจริงมากที่สุด

9.1.1.4.3 ระบบรับรู้ของกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception)

เกี่ยวข้องกับการสัมผัส รวมถึงการรับรู้สัมผัสเจ็บ อุณหภูมิ และแรงดันต่างๆ ซึ่งการสัมผัสสามารถแบ่งออกได้เป็นสัมผัสหยาบ คือการรู้สึกถึงการสัมผัสแบบเบาๆ และสัมผัสละเอียดคือความรู้สึกเกี่ยวกับขนาดและรูปร่างของวัตถุ โดยความไวในการรับรู้สัมผัสของผิวหนังตามตำแหน่งต่างๆทั่วร่างกายจะต่างกัน

9.1.1.5 สรุปเครื่องจำลองเสมือนจริง

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผล สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเครื่องนี้มีความสามารถเคลื่อนที่ได้ใน 3 องศาอิสระ ประกอบด้วย การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X (Roll movement), การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน Y (Pitch movement), การเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z (Z movement)

เนื่องจากขั้นตอนในการทำงานของระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผลนั้น จะต้องสั่งงานผ่านโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง ซึ่งโปรแกรมนี้นั้นทางบริษัทผู้ผลิตเครื่องจำลองเสมือนจริง เป็นผู้พัฒนา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาโปรแกรมการทำงานของเครื่องจำลองเสมือนจริง รวมถึงพื้นที่ทำงาน (Workspaces) ของเครื่องจำลองเสมือนจริง ทั้งหมดนี้เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมการติดต่อสื่อสารและประมวลผล และออกแบบตัวกรองเสมือนจริง เพื่อให้สามารถควบคุมให้เครื่องจำลองเสมือนจริงสามารถจำลองความเสมือนจริงได้ดีที่สุด

9.1.1.6 สรุปตัวกรองเสมือนจริง

ตัวกรองเสมือนจริง (Washout filter) เป็นส่วนสำคัญในการจำลองความเสมือนจริงของ เครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) ซึ่งกระบวนการทำงานของตัวกรองเสมือนจริงนี้ได้ถูกพัฒนา มาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาถึงกระบวนการทำงานของตัวกรองเสมือนจริงและได้ออกแบบตัวกรองเสมือนจริงที่มีความเหมาะสมกับเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) แบบ 3 องศาอิสระ ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ ดังจะเห็นได้จากผลของการทดสอบขับยานยนต์ย่อยส่วนบนสนามทดสอบ แล้ววิเคราะห์ถึงความสอดคล้องระหว่างค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมของเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) กับสภาพของสนามทดสอบ พบว่าข้อมูลที่ผ่านกระบวนการตัวกรองเสมือนจริง มีความสอดคล้องกับสภาพของสนามเป็นอย่างดี รวมไปถึงการวิเคราะห์และปรับปรุงค่าความเร่งเชิงเส้นที่อุปกรณ์ตรวจวัด สามารถวัดได้ โดยการนำข้อมูลมาตรวจสอบภาพเพื่อตรวจจับตำแหน่งของยานยนต์ย่อยส่วนเข้ามามีส่วนร่วม ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ขับขี่ที่ควบคุมอยู่บนเครื่องจำลองเสมือนจริง (Simulator) รู้สึกเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น

9.1.1.7 สรุประบบการติดต่อสื่อสารและประมวลผล

ระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลมีหน้าที่ ดังนี้

9.1.17.1 รับ-ส่งข้อมูลจากยานยนต์ย่อยส่วน

ระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลจะส่งข้อมูลสถานการณ์ขับขี่ ที่ได้รับมาจากผู้ควบคุมซึ่งอยู่ภายในเครื่องจำลองเสมือนจริง ไปให้กับยานยนต์ย่อยส่วน ผ่านชุดรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย โดยข้อมูลการขับขี่นั้น ประกอบด้วย มุมบังคับพวงมาลัย, อัตราเร่ง, อัตราเบรก และเกียร์ ในเวลาเดียวกันที่ยานยนต์ย่อยส่วนจะส่งข้อมูลสถานะของยานยนต์มาให้กับระบบควบคุมติดต่อสื่อสารและประมวลผล ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลความเร็วเชิงเส้น 3 แนวแกน (x, y, z), ความเร็วเชิงมุม 3 แนวแกน (x, y, z), มุมการเลี้ยวของล้อหน้า และความเร็วของล้อทั้งสิ้น โดยอัตราการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลกับยานยนต์ย่อยส่วน เท่ากับ 100 ข้อมูลต่อวินาที

9.1.1.7.2 รับ-ส่งข้อมูลจากเครื่องจำลองเสมือนจริง

ระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลจะรับข้อมูลการขับขี่จากผู้ควบคุม ผ่านทางสื่อสารด้วย USB โดยข้อมูลที่ได้รับนี้จะประกอบด้วย มุมบังคับพวงมาลัย, อัตราเร่ง, อัตราเบรก และเกียร์ โดยเมื่อระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลทำการประมวลผลข้อมูลสถานะของยานยนต์ที่ได้รับมาจากยานยนต์ย่อยส่วนแล้ว จึงจะส่งข้อมูลการจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองเสมือนจริงไปให้กับโปรแกรมควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริง ผ่านการติดต่อสื่อสารแบบ UDP โดยอัตราการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระบบติดต่อสื่อสารและประมวลผลกับเครื่องจำลองเสมือนจริง เท่ากับ 100 ข้อมูลต่อวินาที

9.1.1.8 สรุปการทดสอบเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

จากข้อมูลการทดสอบ เปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมที่มีตัวกรองเสมือนจริง กับระบบควบคุมที่ไม่มีตัวกรองเสมือนจริง พบว่าระบบควบคุมที่มีตัวกรองเสมือนจริงร่วมด้วย นั้นสามารถสร้างความเสมือนจริงได้ดีกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีตัวกรองเสมือนจริง เนื่องจากกระบวนการของตัวกรองเสมือนจริง นั้นจะมีขั้นตอนการคำนวณที่ช่วยสร้างความเสมือนจริง ที่มีความเหมาะสมกับเครื่องจำลองเสมือนจริงแบบ 3 องศาอิสระที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ แต่ทั้งนี้ก็ยังมีส่วนที่ผู้ขับขี่ที่กำลังควบคุมยานยนต์ย่อยส่วนผ่านเครื่องจำลองเสมือนจริง นั้นก็ยังคงมีความรู้ไม่เสมือนจริงอยู่ คือช่วงสภาวะที่ยานยนต์เริ่มเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง สาเหตุเนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น ได้นำเอาตัวแปรความเร็วเชิงเส้นเข้ามาคำนวณด้วย โดยความเร็วเชิงเส้นนี้เอง ที่ทำ

ให้เกิดการคำนวณที่ยังมีความผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Xbow) ที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อนั้นสามารถตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นรวมระหว่างความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่กับความเร่งที่เกิดจากการเอียง ซึ่งในขั้นตอนของการคำนวณหามุมการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น ค่าความเร่งเชิงเส้นที่ต้องการนั้น ต้องการเพียงความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเอียง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แก้ปัญหาโดยติดตั้งกล้องจับภาพมุมสูงเพื่อคำนวณหาความเร่งเชิงเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ แล้วนำมาชดเชยในขั้นตอนการคำนวณหามุมการเอียง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสามารถชดเชยได้เป็นอย่างดี

9.2 ข้อเสนอแนะ

สิ่งที่ควรปรับปรุงในงานวิจัยนี้คือมีความล่าช้า (Delay) ในการแสดงผลการจำลองความเสมือนจริงด้วยเครื่องจำลองเสมือนจริง สาเหตุเกิดจากสัญญาณข้อมูลสถานะของยานยนต์ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งบนยานยนต์ย่อนั้นมีสัญญาณรบกวน (Noise) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนนี้ออกไป ซึ่งส่งผลทำให้สัญญาณภายหลังจากการกรอง มีความล่าช้าเกิดขึ้น และส่งผลต่อการนำไปแสดงผลที่เครื่องจำลองเสมือนจริง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า มีความล่าช้าเกิดขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] ศุภวุฒิ จันทร์พานูวัฒน์. เอกสารประกอบการสอนวิชา Automotive Control. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548. (อัดสำเนา)
- [2] Maren, C.L.A.V. and Jiri, S.. Scaled Vehicle Dynamics of Davinci Project. The Netherlands, Delft University of Technology, 2001
- [3] Brennan, S.N. Modeling and Control Issues Associated with Scaled Vehicles. Master's thesis, Mechanical engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [4] Rajesh, R. Vehicle Dynamics and Control: Mechanical Engineering Series.(n.p.), Springer, 2005
- [5] Dominick, B., et al. Nervous System[Online].CA. Available from: <https://eapbiofield.wikispaces.com/Nervous+System+ch+48+KGB>[2009,May 4]
- [6] บุรวัลย์ ผลมั่ง. ความน่าเชื่อถือของการวัดระยะทางการแกว่งของจุดศูนย์กลางแรงกดขณะยืนขาเดียว. กรุงเทพมหานคร: สาขาเวชศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [7] กนกวรรณ ติลกสกุลชัย และชัยเลิศ พิษิตพรชัย. สรีรวิทยา 3. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์เรือนแก้วเรือนพิมพ์, 2545.
- [8] Physiological Mechanism: Vestibular Mechanism[Online]. (n.d.). Available from: http://nostalg.org/des/physiological_mechanisms.htm#Vestibular [2009,May 4]
- [9] Marjorie, A.M.. Our Sense of Touch: Two-Point Discrimination [Online].(n.d.). Available from: <http://faculty.washington.edu/chudler/twopt.html#top> [2009, May 4]
- [15] Robert, J.T. and Frank, M.C.. Motion Cueing Algorithm Development : Human-Centered Linear and Nonlinear Approaches. NY ,State University of Newyork,2005.
- [16] Raphael, S. , Jehuda, I.S. and Huang J.K.. An Optimal Control Approach to the Design of Moving Flight Simulator. IEEE , vol. SMC-12 , No.6 , 1982.
- [17] Wang, S.C. and Fu, L.C.. Predictive Washout Filter Design for VR-based Motion Simulator. IEEE ,2004
- [18] Hwang, T.S. and Kuo, M.S.. Optimal Genetic and Adaptive Fuzzy Washout Filter Design in the Motion-Cueing Simulator. Asian Journal of Control ,Vol 10,2008.

[19] You, K.S. and Lee, M.C.. Development of a Washout Algorithm for a Vehicle Driving Simulator using New Tilt Coordinate and Return Mode. ACMD ,2004

[20] ปริญญา วัฒนกุลชัย. ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองพลศาสตร์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. 2552.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การหาสถานะการเคลื่อนที่โดยแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบสองและสามมิติ

Dynamic states calculation based on 2 and 3 Dimensional vehicle models

กฤษฎา จันท์แดง และ วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2186588 โทรสาร 0-2186588 อีเมล krissada.C@student.chula.ac.th Witaya.W@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับพลศาสตร์ยานยนต์ ในสถานะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Longitudinal Velocity) ด้วยความเร็วคงที่ โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ หลักด้วยกัน ในแบบแรก คือ แบบ 2 ล้อ (2 มิติ) ซึ่งในแบบนี้ จะเป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความสมมาตรกันระหว่างด้านฝั่งซ้ายและฝั่งขวา จึงสามารถถูกรวมเป็นอันเดียวกัน ทำให้จากเดิมที่ล้อนามี 2 ล้อ จึงโดนยุบรวมเหลือล้อเดียวซึ่งล้อหลังก็พิจารณาในลักษณะเดียวกัน ทำให้เหลือจำนวนของล้อ เท่ากับ 2 ล้อ ซึ่งตัวแปรสถานะทางพลศาสตร์ที่นำมาพิจารณาคือ ความเร็วด้านข้าง (Lateral Velocity) กับ ความเร็วเชิงมุมในแนวระนาบ (Yaw Rate, \dot{z}) ในแบบที่ 2 คือ แบบ 4 ล้อ (3 มิติ) สำหรับ แบบนี้จะเป็นการพิจารณาแบบไม่สมมาตร ทำให้ตัวแปรสถานะทางพลศาสตร์ที่นำมาพิจารณา จะมากกว่า แบบ 2 ล้อ ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วด้านข้าง, ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน (x, y, z) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทางพลศาสตร์ ทั้ง 2 แบบนี้ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลสถานะที่ตรวจวัดได้จากยานยนต์ยอส่วน โดยยานยนต์ยอส่วนนี้ได้ถูกปรับแต่งขึ้นส่วนตามหลักการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimension analysis) เพื่อให้มีพลศาสตร์ใกล้เคียงกับยานยนต์จริง และได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดบนยานยนต์ยอส่วน สำหรับวัดข้อมูลสถานะของยานยนต์ประกอบไปด้วย ความเร่งเชิงเส้นใน 3 แนวแกน (x, y, z), ความเร็วเชิงมุม 3 แนวแกน (x, y, z), ความเร็วรอบของล้อ โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้นั้น จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ 2 และ 3 มิติ

Abstract

This research study about Vehicle dynamics on constant longitudinal velocity condition. 2 Simulation model considered, first model is 2 dimensions (2 wheels) analysis. Symmetry condition are used in this case. By the condition, 2 wheels remaining. Vehicle state including lateral velocity and yaw rate. Second model analysis is 3 dimension (4 wheels), non-symmetry analysis considered in this case. So the model have many vehicle state as roll rate, pitch rate, roll rate. Finally, we compare between the result of simulation and vehicle state from รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

sensor on a scaling car. This scaling car improved on dimension analysis for dynamics equivalent with a vehicle. On scaling car have a sensor as accelerometer (3-axis), potentiometer (steering angle measurement) and wheel speed sensor.

1. บทนำ

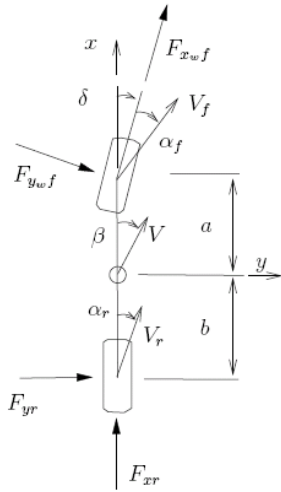
ความก้าวหน้าของยานยนต์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว การสร้างระบบช่วยในการขับขี่ต่างๆ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมยานยนต์ได้สะดวกมากขึ้น เช่นระบบ ABS (Anti-Brake System), ระบบควบคุมความเร็วอัตโนมัติ (Cruise Control), ระบบ Active Yaw Control เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบระบบช่วยในการขับขี่นี้ ผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจด้านพลศาสตร์ยานยนต์เป็นอย่างดี เพื่อให้ผู้ออกแบบจะได้ทราบถึงการตอบสนองของยานยนต์ได้ในทุกสภาวะ เช่น สภาวะที่ยานยนต์กำลังเข้าโค้ง เป็นต้น หลังจากการวิเคราะห์ ผู้ออกแบบจะจำลองสภาวะต่างๆ ของยานยนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ออกแบบทราบถึงการตอบสนองของยานยนต์ได้มากขึ้น โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองบนคอมพิวเตอร์นี้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ โดยระดับความซับซ้อนของสมการคณิตศาสตร์นั้นจะถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขต่างๆ ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ เช่น การจำลองในแบบ 2 มิติ และแบบจำลอง 3 มิติ เป็นต้น เมื่อผู้ออกแบบมีความมั่นใจผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้ว จึงจะเข้าสู่ขั้นตอนของการทดสอบกับยานยนต์จริง โดยเหตุที่ต้องผ่านขั้นตอนการจำลองบนคอมพิวเตอร์ก่อนนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ขับขี่และเพื่อลดต้นทุนในกรณีที่เกิดความผิดพลาดจากขั้นตอนของการออกแบบ แต่ทว่ายังไม่สามารถเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในการทดสอบกับยานยนต์จริงได้ทั้งหมด และในกรณีที่ผู้ออกแบบมีความต้องการทดสอบในสภาวะการขับขี่ที่มีความเสี่ยงสูง เช่น การขับขี่บนถนนที่มีความลื่นมากกว่าปกติ ก็อาจจะทำให้ง่ายต่อการเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการนำเอายานยนต์ยอส่วนมาใช้ในการทดสอบแทนยานยนต์จริง เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ขับขี่ และลดต้นทุนการบำรุงรักษาในกรณีที่เกิดความเสียหายกับยานยนต์ได้ โดยก่อนที่จะนำเอายานยนต์ยอส่วนมาใช้งานได้นั้น ยานยนต์ยอส่วนจะต้องถูกปรับแต่งขึ้นส่วนต่างๆ ซึ่งการปรับแต่งนี้จะต้องยึดตามหลักการวิเคราะห์

เชิงมิติ (Dimension analysis) เพื่อให้มีการตอบสนองทางพลศาสตร์ใกล้เคียงกับยานยนต์จริง รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) ต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลสถานะการเคลื่อนที่ของยานยนต์ย่อยส่วน (Vehicle state) เช่น ความเร่งเชิงเส้น, มุมบังคับเลี้ยว เป็นต้น

2. พลศาสตร์ยานยนต์

การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการตอบสนองที่เกิดขึ้นกับยานยนต์ เพื่อให้มีความเข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลกับพลศาสตร์ยานยนต์ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงพลศาสตร์ของยานยนต์แบบ 2 ล้อ และแบบ 4 ล้อ ซึ่งการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 ล้อ จะเป็นการจำลองพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของรถอย่างง่าย ในรูปแบบ 2 มิติ ซึ่งจะมีตัวแปรอิสระ (degree of freedom) 2 ตัวแปรคือการเคลื่อนที่ด้านข้าง (lateral motion) และการหมุนของรถรอบแกน Z (yaw motion) สำหรับการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 4 ล้อ จะเป็นการพิจารณาในรูปแบบ 3 มิติ ทำให้การจำลองในแบบ 4 ล้อนี้มีตัวแปรอิสระมากกว่าในแบบ 2 ล้อ โดยในการจำลองพลศาสตร์แบบ 2 ล้อ และแบบ 4 ล้อนี้จะพิจารณาในสถานะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วคงที่ (longitudinal velocity constant)

2.1 พลศาสตร์ของรถแบบ 2 ล้อ (Bicycle model)



รูปที่ 1 แบบจำลองรถของ Bicycle model [2]

สำหรับการจำลองแบบ 2 ล้อนี้ได้มีการนำไปใช้สำหรับการพัฒนาระบบควบคุมรถในหลายงานวิจัย [3], [4] โดยการจำลองแบบนี้จะเป็นการจำลองในสถานะที่รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วคงที่ (Longitudinal velocity constant) และไม่คำนึงถึงการหมุนของลำตัวรถรอบแกน X (Roll motion) และการหมุนรอบแกน Y (Pitch motion) และพิจารณาถึงการเคลื่อนที่และแรงที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านซ้ายและขวามีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำมารวมกันเป็น 1 ล้อได้ ทำให้เหลือล้อทั้งหมดเพียง 2 ล้อ เนื่องจากการคิดแบบรวมกันระหว่างล้อด้านซ้ายและขวาโดยมีลักษณะดังรูปที่ 1

$$m a_y = F_{yf} \cos \delta + F_{yr} \quad (1)$$

$$I_z \dot{r} = a F_{yf} \cos \delta - b F_{yr} \quad (2)$$

$$a_y = \dot{v} + r u \quad (3)$$

$$\dot{v} = -r u + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{yf} \cos \delta + F_{yr}) \quad (4)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z} \right) (a F_{yf} \cos \delta + b F_{yr}) \quad (5)$$

โดยที่

$$F_y = C_\alpha \alpha \quad (6)$$

$$\alpha_f = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v + ar}{u} \right) \quad (7)$$

$$\alpha_r = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v - br}{u} \right) \quad (8)$$

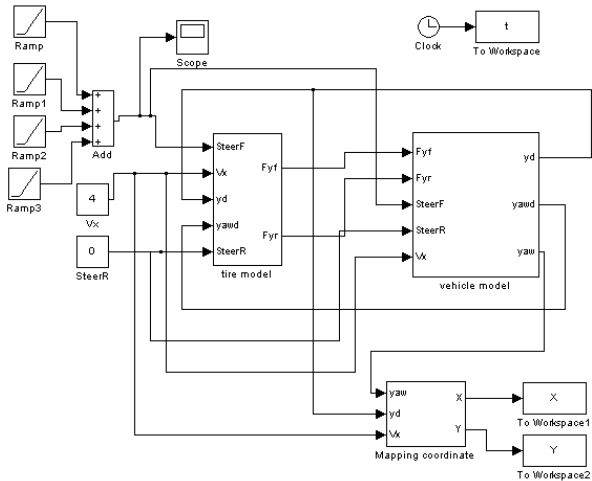
$$F_{yf} = 2 C_{\alpha f} \left(\delta_f - \tan^{-1} \left[\frac{v + ar}{u} \right] \right) \quad (9)$$

$$F_{yr} = 2 C_{\alpha r} \left(\delta_r - \tan^{-1} \left[\frac{v - br}{u} \right] \right) \quad (10)$$

ในขณะที่

- a หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของรถถึงล้อหน้า
- b หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของรถถึงล้อหลัง
- δ หมายถึง มุมของพวงมาลัย
- β หมายถึง slip angle ที่จุดศูนย์กลางของรถยนต์
- V หมายถึง ทิศทางความเร็วของจุดศูนย์กลางรถยนต์
- α_f หมายถึง slip angle ที่ล้อหน้า
- α_r หมายถึง slip angle ที่ล้อหลัง
- V_f หมายถึง ทิศทางความเร็วของล้อหน้า
- V_r หมายถึง ทิศทางความเร็วของล้อหลัง
- F_{yf} หมายถึง แรงที่กระทำด้านข้าง (lateral force) ของล้อหน้า
- F_{yr} หมายถึง แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหลัง
- C_α หมายถึง Cornering stiffness
- I_z หมายถึง Moment of inertia รอบแกน Z
- r หมายถึง ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน Z
- m หมายถึง มวลของรถยนต์
- u หมายถึง ความเร็วในแนวแกน x
- α_f หมายถึง slip angle ของล้อหน้า
- α_r หมายถึง slip angle ของล้อหลัง
- δ_f หมายถึง มุมของล้อหน้า
- δ_r หมายถึง มุมของล้อหลัง

จากนั้นจึงได้นำไปเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองระบบพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมของ MATLAB ดังรูป

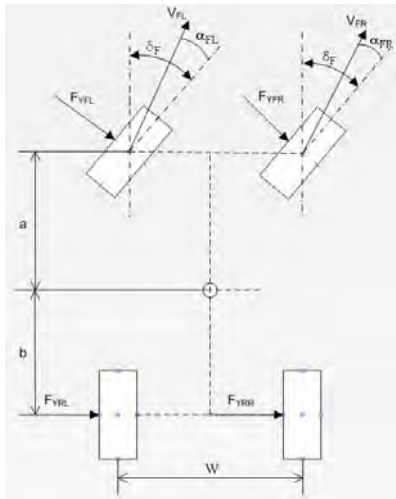


รูปที่ 2 Bicycle model

2.2 พลศาสตร์ของรถแบบ 4 ล้อ

สำหรับการจำลองแบบ 4 ล้อนี้อาจมีความซับซ้อนมากกว่าแบบ 2 ล้อ เนื่องจากเป็นการพิจารณาในรูปแบบ 3 มิติ ดังนั้นจึงมีผลของการหมุนรอบแกน X (Roll) และการหมุนรอบแกน Y (Pitch) ด้วย โดยจะเป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละล้อ

พิจารณาในระนาบ X-Y



รูปที่ 3 ระนาบ X-Y

$$\ddot{y} = \frac{1}{M} \{ (\cos(\delta_f)) F_{YFL} + (\cos(\delta_f)) F_{YFR} + F_{YRL} + F_{YRR} \} + \dots - ru - g \sin(\phi) \quad (11)$$

$$I_Z \ddot{\psi} = \left(\frac{W}{2} \right) [-(\sin(\delta_f)) F_{YFL} + (\sin(\delta_f)) F_{YFR}] - b(F_{YRL} + F_{YRR}) + \dots + a [(\cos(\delta_f)) F_{YFL} + (\cos(\delta_f)) F_{YFR}] \quad (12)$$

ในขณะที่

$$F_{YFR} = C_{\alpha_F} \left[\delta_F - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + a \dot{\psi}}{u - \frac{W}{2} \dot{\psi}} \right) \right] \quad (13)$$

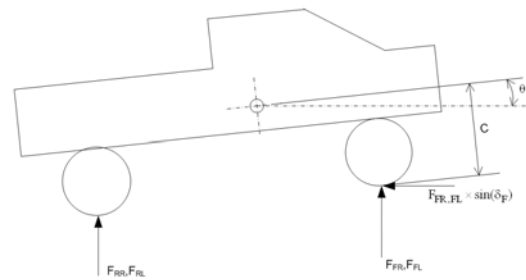
$$F_{YFL} = C_{\alpha_F} \left[\delta_F - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + a \dot{\psi}}{u + \frac{W}{2} \dot{\psi}} \right) \right] \quad (14)$$

$$F_{YRR} = C_{\alpha_R} \left[\delta_F - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} - b \dot{\psi}}{u - \frac{W}{2} \dot{\psi}} \right) \right] \quad (15)$$

$$F_{YRL} = C_{\alpha_R} \left[\delta_F - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} - b \dot{\psi}}{u + \frac{W}{2} \dot{\psi}} \right) \right] \quad (16)$$

พิจารณาในระนาบ X-Z

ระนาบ X-Z นี้จะพิจารณาแรงกระทำที่ล้อในแนวแกน X และ Z รวมถึงการหมุนของยานยนต์รอบแกน Y (Pitch)



รูปที่ 4 ระนาบ X-Z

$$I_X \ddot{\phi} = \left(\frac{W}{2} \right) \Delta_1 - F_{YFL} \cos(\delta_f) \Delta_2 - F_{YFR} \cos(\delta_f) \Delta_3 + \dots - F_{YRL} \Delta_4 - F_{YRR} \Delta_5 \quad (17)$$

โดยที่

$$\Delta_1 = F_{FL} + F_{RL} - F_{FR} - F_{RR} \quad (18)$$

$$\Delta_2 = h_{CG} - a\theta - \frac{W}{2} \phi \quad (19)$$

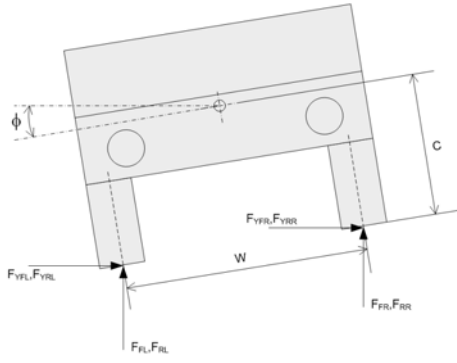
$$\Delta_3 = h_{CG} - a\theta + \frac{W}{2} \phi \quad (20)$$

$$\Delta_4 = h_{CG} + b\theta - \frac{W}{2} \phi \quad (21)$$

$$\Delta_5 = h_{CG} + b\theta + \frac{W}{2} \phi \quad (22)$$

พิจารณาในระนาบ Y-Z

ระนาบ Y-Z นี้จะพิจารณาแรงกระทำที่ล้อในแนวแกน Y และ Z รวมถึงการหมุนของยานยนต์รอบแกน X (Roll)



รูปที่ 5 ระนาบ Y-Z

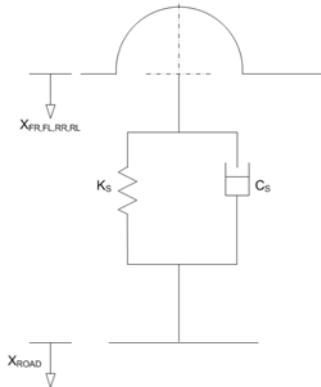
$$I_Y \ddot{\theta} = a(F_{FL} + F_{RL}) - b(F_{FR} + F_{RR}) - F_{YFL}(\cos(\delta_F))\Delta_3 + \dots - F_{YFL}(\sin(\delta_F))\Delta_2 \quad (23)$$

โดยที่

$$\Delta_2 = h_{CG} - a\theta - \frac{W}{2}\phi \quad (19)$$

$$\Delta_3 = h_{CG} - a\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (20)$$

ชุดรองรับการสั่นสะเทือน



รูปที่ 6 ชุดรองรับการสั่นสะเทือน

$$F_{FR} = K(X_{FR} - X_{ROAD}) + C(\dot{X}_{FR} - \dot{X}_{ROAD}) \quad (24)$$

$$F_{FL} = K(X_{FL} - X_{ROAD}) + C(\dot{X}_{FL} - \dot{X}_{ROAD}) \quad (25)$$

$$F_{RR} = K(X_{RR} - X_{ROAD}) + C(\dot{X}_{RR} - \dot{X}_{ROAD}) \quad (26)$$

$$F_{RL} = K(X_{RL} - X_{ROAD}) + C(\dot{X}_{RL} - \dot{X}_{ROAD}) \quad (27)$$

$$X_{FR} = X_{CG} - a\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (28)$$

$$X_{FL} = X_{CG} + a\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (29)$$

$$X_{RR} = X_{CG} - b\theta - \frac{W}{2}\phi \quad (30)$$

$$X_{RL} = X_{CG} - b\theta + \frac{W}{2}\phi \quad (31)$$

$$\dot{X}_{FR} = \dot{X}_{CG} - a\dot{\theta} + \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (32)$$

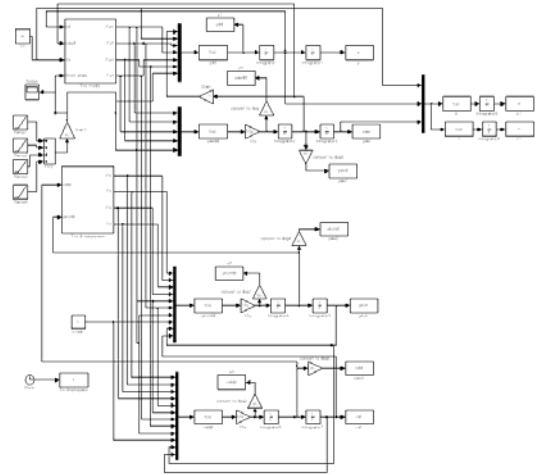
$$\dot{X}_{FL} = \dot{X}_{CG} + a\dot{\theta} + \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (33)$$

$$\dot{X}_{RR} = \dot{X}_{CG} - a\dot{\theta} - \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (34)$$

$$\dot{X}_{RL} = \dot{X}_{CG} - b\dot{\theta} + \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (35)$$

$$M\ddot{X}_{CG} = -F_{FR} - F_{FL} - F_{RR} - F_{RL} + Mg \quad (37)$$

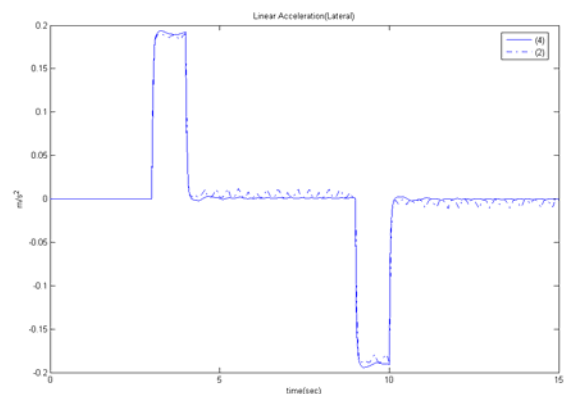
จากนั้นจึงได้นำไปเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองระบบพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมของ MATLAB ดังรูป



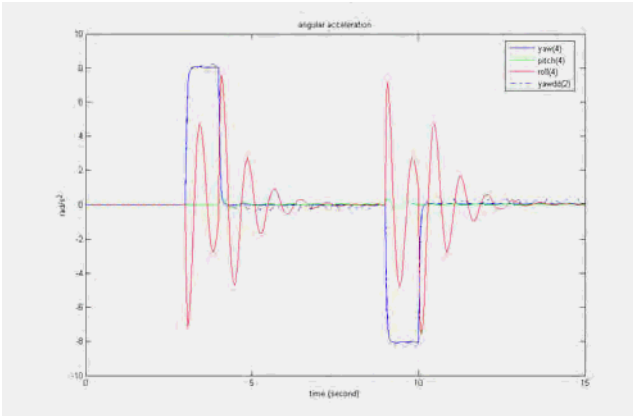
รูปที่ 7 Simulate แบบจำลอง 4 ล้อ

3. การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

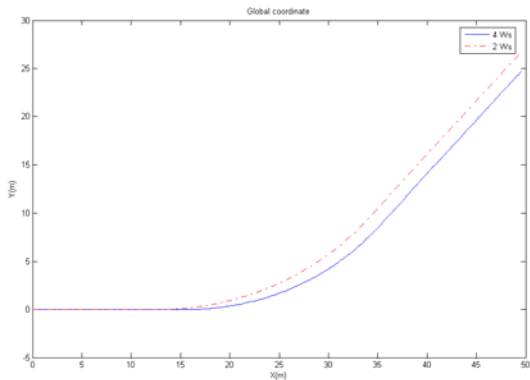
การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างแบบจำลอง 2 ล้อ กับ แบบจำลอง 4 ล้อ ภายใต้เงื่อนไขวิ่งไปข้างหน้าด้วยความเร็วคงที่ (Longitudinal velocity constant)



รูปที่ 9 Lateral Acceleration



รูปที่ 10 Angular Acceleration



รูปที่ 11 Trajectory

จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่าทั้งสองค่า คือค่าความเร็วเชิงมุมแกน Z (Yaw rate) และความเร่งเชิงเส้นด้านข้าง มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ถึงแม้ว่าสมการที่ (11) มีตัวแปร ϕ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ (Longitudinal Velocity) ที่ใช้ในการคำนวณนี้มีค่าต่ำ จึงทำให้ผลของแรงโน้มถ่วงมีผลต่อความเร่งด้านข้างน้อย แต่ผลของแรงโน้มถ่วงนี้จะมีผลมากขึ้นถ้ายานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้นในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ผลที่คำนวณได้จากสมการพลศาสตร์ในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อยานยนต์มีความเร็วมากขึ้น ข้อมูลที่คำนวณได้จากทั้ง 2 แบบ คือ แบบ 2 มิติ กับ 3 มิติ จะแตกต่างกันมากขึ้น

4. ยานยนต์ย่อส่วน (Scaling Vehicle)

ยานยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเก็บข้อมูลสถานะ (Vehicle state) นี้ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) เพื่อเก็บข้อมูลสถานะของยานยนต์ (vehicle state) และได้ถูกดัดแปลงขึ้นส่วน เพื่อให้มีพลศาสตร์ของยานยนต์ย่อส่วนมีความสมมูลกับพลศาสตร์ของยานยนต์จริง ซึ่งการดัดแปลงขึ้นส่วนนั้นได้ยึดตามหลักการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimension analysis, PI Theorem) โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์เชิงมิตินั้นจะพิจารณาตัวแปรที่อยู่ในสมการพลศาสตร์ของยานยนต์ เพื่อนำตัวแปรทั้งหมดมาจัดเป็นกลุ่ม ซึ่งจะอยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) และการดัดแปลงยานยนต์ย่อส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็ยึดตามหลักการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้ โดยนำตัวแปรมาจากสมการ

พลศาสตร์ยานยนต์ในแบบ 2 ล้อ จากสมการที่ [4],[5] ทำให้ได้กลุ่มตัวแปรใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{a}{L} , \quad \Pi_2 = \frac{b}{L} , \quad \Pi_3 = \frac{C_{\omega} L}{\mu^2} \\ \Pi_4 &= \frac{C_{\omega} L}{\mu^2} , \quad \Pi_5 = \frac{I_z}{mL^2} \end{aligned} \quad (38)$$

การดัดแปลงขึ้นส่วนของยานยนต์ย่อส่วน โดยมีจุดประสงค์ให้ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติของยานยนต์ย่อส่วนเท่ากับยานยนต์จริง ดังนั้นจึงต้องดัดแปลงตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง, โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน Z, น้ำหนักของยานยนต์ย่อส่วนใหม่ รวมไปถึงการเลือกรูปแบบของล้อยางกับพื้นถนนที่ใช้ทดสอบ เพื่อให้ได้ค่า Cornering Stiffness ตามที่ต้องการ

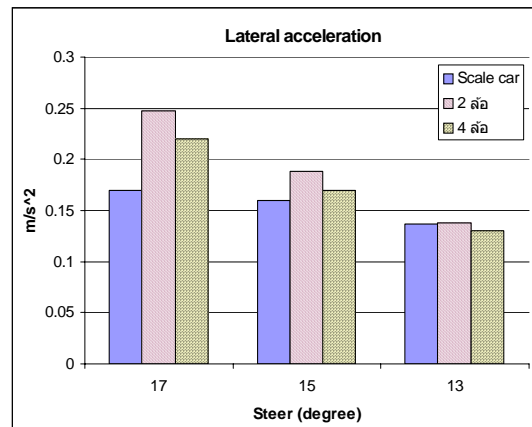


รูปที่ 12 ยานยนต์ย่อส่วน ก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) ดัดแปลง

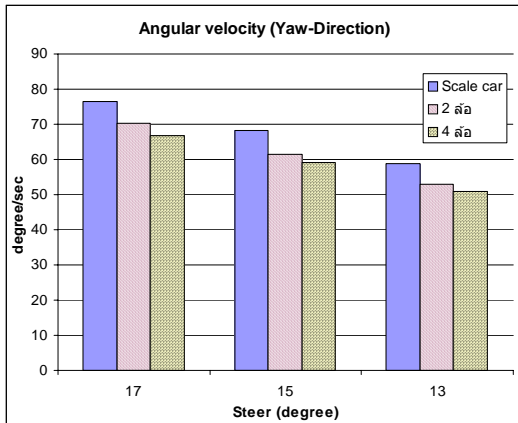
5. เปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากยานยนต์ย่อส่วน

การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างข้อมูลที่ได้จากยานยนต์ย่อส่วนกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์นี้ เพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการทดสอบนี้ได้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานยนต์ย่อส่วนให้วิ่งวนเป็นวงกลมและวิ่งด้วยความเร็วคงที่

ข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้น ประกอบด้วยความเร่งเชิงเส้นด้านข้าง (Lateral Acceleration) กับความเร็วเชิงมุมในแนวแกน Z (Yaw rate)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้าง



รูปที่ 14 เปรียบเทียบความเร่งด้านข้าง

การเปรียบเทียบความเร่งด้านข้างระหว่างแบบจำลอง 2 ล้อกับแบบจำลอง 4 ล้อ นั้นผลปรากฏว่าแบบจำลอง 4 ล้อมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง 2 ล้อ และที่มุมบังคับเลี้ยวน้อย จะมีความถูกต้องมากกว่าข้อมูลที่มีมุมบังคับเลี้ยวมาก ในขณะที่การเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมในแนวแกน Z ระหว่างแบบจำลอง 2 ล้อกับแบบจำลอง 4 ล้อ ผลปรากฏว่าแบบจำลอง 2 ล้อมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง 4 ล้อ

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการหาสภาวะ การเคลื่อนที่โดยการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยในแบบจำลองพลศาสตร์ 2 มิตินั้นจะเป็นการจำลองอย่างง่าย โดยการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านซ้ายและขวา มีความสมมาตรกัน อีกทั้งยังเป็นการวิเคราะห์ในระนาบเดียว ทำให้ลดระดับความซับซ้อนของสมการพลศาสตร์ลงไปได้มาก แต่ว่าผลของการคำนวณที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 ล้อนี้ จะมีความถูกต้องแม่นยำดี ในช่วงที่ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เนื่องจากในขณะนั้นผลกระทบของตัวแปรอื่นจะมีน้อย เช่น ในขณะที่ขับเข้าโค้ง โครงสร้างตัวของยานยนต์จะเกิดการเอียง เนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ซึ่งถ้ายานยนต์วิ่งเข้าโค้งด้วยความเร็วสูง จะเกิดการเอียงของโครงสร้างตัวยานยนต์รอบแกน X มาก (Roll movement) ซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณของพลศาสตร์ในแบบ 2 มิติ สำหรับการจำลองพลศาสตร์แบบ 3 มิติ สมการพลศาสตร์จะมีความซับซ้อน เนื่องจากการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นทั้งสี่ล้อ โดยแยกจากกันอย่างอิสระ ทำให้ตัวแปรที่ใช้ในสมการพลศาสตร์ก็จะมีมากขึ้นด้วย รวมถึงความซับซ้อนในการพิจารณาในระนาบ ไต ระนาบหนึ่งก็จะมีผลของตัวแปรในระนาบอื่น เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย และผลจากความซับซ้อนของสมการพลศาสตร์นี้ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณก็จะมี ความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการคำนวณพลศาสตร์ในแบบ 2 มิติ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sean N.Brennan, 2002. On size and control: The use of dimensional analysis in controller design, University of Illinois at Urbana-Champaign
- [2] ดร.ศุภวุฒิ จันทร์านูวัฒน์, 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชา Automotive Control, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] C.L.A.van Maren, J. Sika, 2001. Scaled Vehicle Dynamic of Davinci Project, Delft University of Technology.
- [4] Sean N.Brennan, 1999. Modeling and control issues associated with scaled vehicles, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Washout Filter for a 3 DOF Simulator

Chundang Krissada and Witaya Wannasuphprasit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Abstract

This paper presents a design of a washout filter for 3 DOF driving simulator. The main purpose is to improve motion control algorithm of the simulator for virtual reality. The simulator can create rotational motion about x-axis (Roll), rotational about y-axis (Pitch), and vertical motion along z-axis (Heave). Dynamic parameters such as linear accelerations, angular velocities, steer angle, and wheel velocities are measured from sensors and fed to the main control system. The vehicle states are processed according to the washout filter which is designed based on human sensation (ex. reacting force on the back), and motion perception via a human inner-ear system.

1. Introduction

Driving Simulator is a device designed to create motions for human driver according to the preprogrammed motion commands. To make the driver feel realistic as if he drives a real vehicle, several factors related to human sensations must be concerned and implement according to human perceptions.

In this work we present a washout filter algorithm that processes vehicle states and other parameters to motions of 3 DOF driving simulator.

Our research involves development of a scaled vehicle that has similar dynamic behavior of a full size vehicle. Communication and control system that are used in this paper is show in Fig1. The scaled vehicle was developed for dynamics equivalent with real vehicle base on dimension analysis and PI's theorem. Various sensors are installed to measure vehicle states such as accelerations (x, y and z axis), angular velocities (about x, y and z axis), steer

angles and wheel speeds (4 wheels). These variables are sent to the control computer via wireless communication. After processed, the data are then sent to simulator controller for controlling simulator movements via UDP communication. At the same time, the control computer receives diving states from a human driver who controls the scaled vehicle on the simulator. He/She controls steer angle, acceleration, brake and gear. Here a computer control sends driving states to the scaled vehicle via wireless communication.

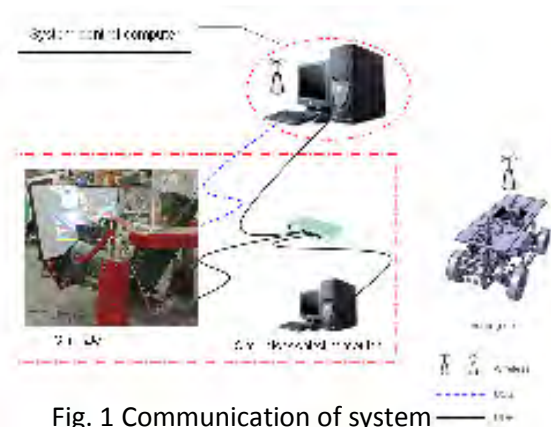


Fig. 1 Communication of system

2. Human perception

Human perceptions related to the simulator design can be divided into 2 main parts; the nervous system and the equilibrium system.

The nervous system is functioned as a processor that received data from any sensing cells of human. The data is then analyzed and interpreted by the brain.

The equilibrium system enables human to perceive stability of body, environment changing, and force acting on the body. During driving, forward acceleration can be perceived

by back skin of the body (feeling a reaction force from the seat) as well as by an inner-ear system. Also the driver can see environment changing by eyes.

Equilibrium system consists of 3 parts namely; vision system, proprioception system, and vestibular system which will be describe more details.

Vestibular

Vestibular consists of semicircular canal and otolith. Semicircular detects angular acceleration when a human is under rotational movement. When a human is under translating, linear and gravitational accelerations will be perceived by otolith. Summation of the perceived accelerations called gravito-inertial force.

To simulate accelerations, we have to generate situations and motions so that otolith perceives the accelerations.

We can simulate linear accelerations by tilting human head and body. For example, when tilting human in pitching direction backward, the gravity will act on otolith and will be perceived as a forward acceleration. Angular acceleration can be simulated by tilting a human sideway in the rolling direction. When performing this simulation, the tilt should be in slow enough so that a human cannot perceive rotation. The minimum velocities that human can be perceived, so called motion thresholds, are listed in the Table 1.

Table 1 Motion thresholds

Axis	Acceleration (m/s ²)	Angular Velocity (Deg/s)
x	0.17	2
y	0.17	2
z	0.28	1.6

3. Classical washout

Consider a diagram in Fig 2. The classical washout processes data as following. First linear accelerations are scaled and bounded so that the simulator will move within its workspace. Next the data are separated 2 parts. One part is passed to a high-pass filter, and then is sent to the simulator. (Normally, this case corresponds to the forward accelerating). The other part is filtered by a low-pass filter. The filtered data is then used to calculate tilt angles. The tilt's velocity is lower than human perception (rate limit), so that human will not perceive the tilt velocity. The purpose of process is simulating linear acceleration. Next the calculated data are included with processed data from the angular velocities that are scaled and high-pass filtered.

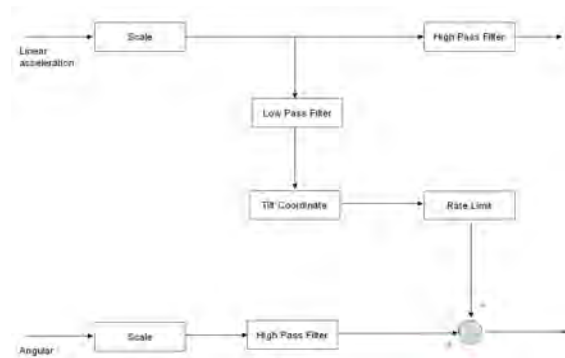


Fig 2. Classical Washout

4. Simulator

To design a washout filter for the simulator, the physical motions of the simulator must be addressed, which includes axis of motion in each degree of freedom (DOF), workspace areas and movement ranges.

The simulator that used in this research has 3 DOF which consists of rotation about X-axis (Roll), rotation about Y-axis (Pitch) and linear movement along Z-axis (Heave). The movable workspace is listed in Table 2.

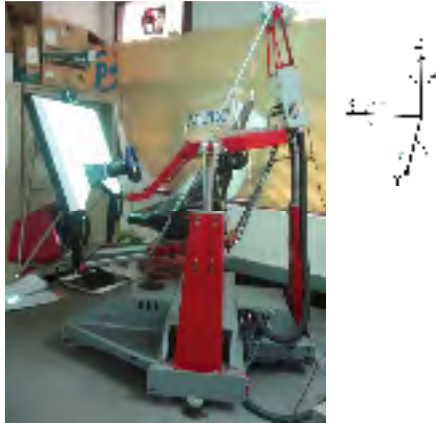


Fig. 3 Simulator

Table 2 Workspace

Orientation	Maximum	Minimum
Roll (Degree)	20	-15
Pitch (Degree)	20	20
Heave (mm)	200	0

5. Washout filter for 3 DOF Simulator

Our inputs to the controller consists of 3 linear accelerations in x, y, z axes and angular velocities around x and y axes. The inputs are measured by an inertia sensor.

These inputs will be processed according to the classical washout filter. Then the controller will send the command to move the simulator. The washout filter should be designed to map the workspace of the simulator. In our case the pitch motion of the simulator simulates forward acceleration and pitch angle of the vehicle. The roll motion of the simulator simulates lateral acceleration and roll angle of the vehicle.

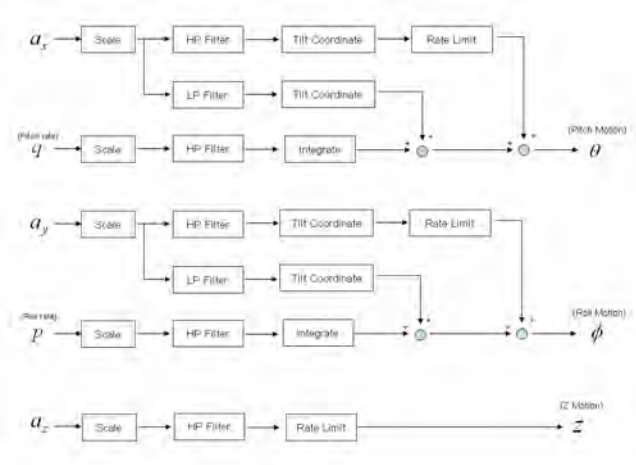


Fig. 4 Washout filter algorithm

5.1 To simulate movement along x- axis (Pitch Motion)

The pitch motion of the simulator makes a driver perceives vehicle's inclination, forward acceleration, and pitch rate. In this process, input variables to be considered are linear acceleration along x axis (a_x) and angular velocity about y axis (Pitch rate).

The inertia sensor provides X-axis acceleration, gravity acceleration, and pitch rate. Here the inclination is calculated using values of gravity and x acceleration terms.

By nature, the response frequency of the forward acceleration is higher than the inclination. Thus after scaled, the data is divided in 2 parts. The first data is filtered by high-pass filter and the other is filtered by low-pass filter.

When driver push a pedal, high-frequency acceleration occurs. The Simulator simulates forward acceleration by tilting up.

The second part of the data is sent to a low-pass filter. The filtered data together with the gravity acceleration are used to calculate inclination angle of the simulator. (This is the case when the vehicle is driven up and down along a slope.) After that the data are sent to tilt

coordinate algorithm for calculate tilt angle as show on equation 1.1.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (1.1)$$

In addition to the forward acceleration and inclination angle terms, an angular velocity about x-axis (roll rate) is sent to a high pass filter and is integrated.

In conclusion, the angular movement about y axis (Pitch motion) of the simulator represents forward acceleration, inclination angle, and pitch rate of the vehicle.

5.2 To simulate movement along y axis (Roll Motion)

Similar to the previous section, the roll motion of the simulator enables human to perceive, lateral acceleration, roll rate and side angle. All processes and logical flows are similar to the Pitch Motion expressed in Section 5.1, provided that all variables involve linear acceleration along y axis and angular velocity about y axis (Roll rate). The side angle is also calculated using gravity and lateral acceleration terms. The tilt coordinate process for calculate side angle is show on equation 1.2.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{a_y}{g}\right) \quad (1.2)$$

5.3 To simulate movement along z axis(Z Motion)

The vertical motion of is simple and relates only acceleration in z axis. The vertical acceleration is scaled and sent to a high pass filter. The data is then evaluated by a rate limit. Note that a human driver will perceive Z-acceleration if the data higher than threshold, as suggested in previous section.

6. Experiment with washout filter

The purpose of this experiment is to verify and test the washout filter. Here a driver controls the scaled vehicle on a known-geometry circuit track shown in Fig 7. The vehicle states, especially acceleration (x, y and z axis) and angular velocity (about x and y axis) are evaluated by washout filter algorithm and sent to the simulator for simulate movement of scaled vehicle with human driver who controls the simulator.

The tilt angles of the simulator with and without washout filter will be compared. The driver was asked to drive around the circuit and go through the 30 deg ramp.



Fig. 7 field testing of scaled vehicle

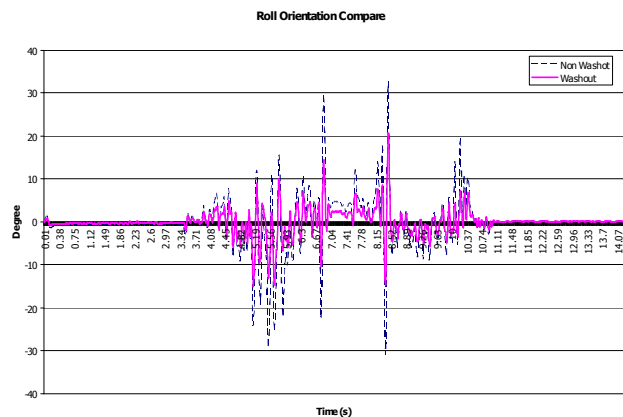


Fig. 8 Roll orientation comparison

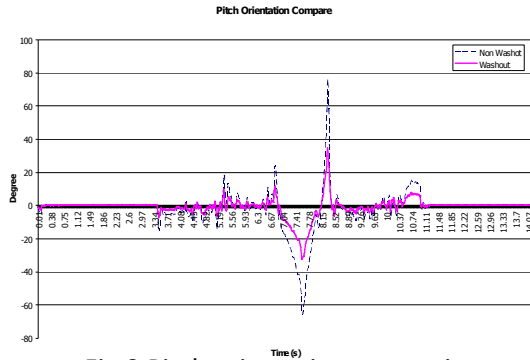


Fig.9 Pitch orientation comparison

After testing, pitch and roll orientations of with and without washout filter were plotted together for comparison as shown in Fig 8 and 9. The results exhibit some differences. Since angular displacements calculated by washout filter have rate limit, the tilt angle are increased a bit slower.

Consider Fig 9. Note that the pitch orientation in the middle portion corresponds to the vehicle moving up and down through the ramp. The solid and dash lines represent the data with and without washout filter respectively.

When the scaled vehicle was driven up and down the ramp, the angular displacements using washout filter are ranged -30 to 30 degree. This corresponds with testing field geometry (30 deg slope angle). However, in comparison, for a system without washout filter, the displacement is a lot higher (-70 to 70 deg), and thus will give a wrong result to the simulator.

7. Acceleration compensation using a video-camera

Even though the washout filter provides a better process to simulate the driving condition. We found some issues from our inertia sensor.

The inertia sensor calculates and interprets the inclination angle from forward and gravity accelerations. For example, if we tilt the vehicle up slowly, the gravity component projected in the car frame varies and enables the sensor to calculate the angle relative to the forward acceleration component. This however has a

weak point. If we increase the forward acceleration while the vehicle remains on a flat street (no inclination), the sensor relative interprets as if there is an inclination.

We solved this issue by adding a vision based positioning system. We added a camera on a ceiling on top of the circuit. The camera system captures the car positions, and then calculates the linear acceleration.

To calibrate the camera and sensor system, we only constrained the vehicle in the forward/backward direction by placing the vehicle on a linear track with no inclination.



Fig.10 scaled vehicle are fixed on linear slide

After compensation, the result was satisfactory improved.

Figure 10 shows pitch orientation data comparison between simulator control system with and without compensation. Range of pitch angles of the system with compensation is -2 to 2 degree which less than the range of uncompensated system (-7 to 7 degree).

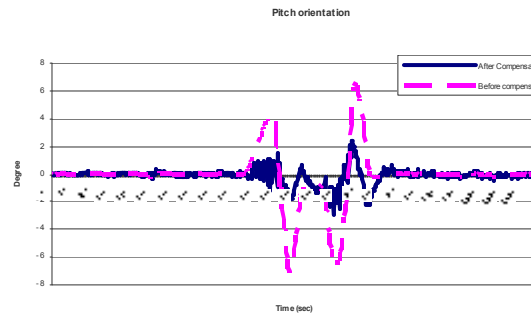


Fig.11 Pitch orientations with and without compensation

9. Conclusion

This paper presents a design of washout filter for 3DOF driving simulator. The washout filter algorithm is implemented based on human perception and motion thresholds. Experiment of the simulator using control system with washout filter provides better results.

Because of the sensor that installed on the scaled vehicle interprets inclination angle based on a relative magnitude of forward and gravity acceleration terms. We solved the problem by using video-camera that installed on the ceiling for measure acceleration movement of the scaled vehicle. The data that processed with washout filter and using video-camera in the control system provides satisfactory results.

Acknowledgment

The authors gratefully appreciate the support from National Metal and Materials Technology Center (MTEC).

Reference

- [1] H Kingma , “Threshold of perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of otolith function”, BioMed central , 22 june 2005[1]
- [2] Zacharias, G.L., “Motion Cue Models for Pilot-Vehicle Analysis”, AMRLTR-78-2, Department of Defense, Alexandria, VA., 1978
- [3] Clark, B., and Stewart, J. D. ,”Thresholds for the Perception of Angular Acceleration About the Three Major Body Axes”, Fourth NASA Symposium on the Role of the Vestibular Organs in Space Exploration. NASA SP-187. 1968.
- [4] Ki Sung You and Min Cheol Lee ,”Development of a Washout Algorithm for a Vehicle Driving Simulator Using New Tilt Coordinate and Return Mode”, ACMD ,2004
- [5] Robert J.Telban and Frank M.Cardullo , “Motion Cueing Algorithm Development : Human-Centered Linear and Nonlinear Approaches”,Newyork
- [6] S. Glasauer and D.M.Merfeld , “Modelling three dimension vestibular responses during complex motion simulation” Harwood academic publishers , Amsterdam ,1997
- [7] A.A.J. Van Egmond , J.J.Groen and L.B.W. Jongkess , “The mechanics of semicircular canal” , The university clinic for disease of the ear , nose and throat , Utrecht , 1949
- [8] Benson, A.J., Hutt, E. C. B., and Brown, S. F.,”Thresholds for the Perception of Whole Body Angular Movement About a Vertical Axis”. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1989.
- [9] Ki Sung You and Min Cheol Lee ,”Development of a Washout Algorithm for a Vehicle Driving Simulator Using New Tilt Coordinate and Return Mode”, ACMD ,2004
- [10] Raphael Sivan , Jehuda Ish-Shalom and Jen-Kuang Huang ,”An Optimal Control Approach to the Design of Moving Flight Simulator” ,IEEE , vol. SMC-12 , No.6 , November/December 1982
- [11] Thong-Shing Hwang and Ming-Sung Kuo,”Optimal Genetic and Adaptive Fuzzy Washout Filter Design in the Motion-Cueing Simulator”, Asian Journal of Control ,Vol 10. ,pp. 88-95 ,January 2008

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษดา จันทร์แดง เกิดที่ รพ.ราชบุรี จ.ราชบุรี ในวันที่ 25 มกราคม พ.ศ.2523 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตในปี พ.ศ.2546 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภายหลังจากจบการศึกษา ได้เข้าทำงานที่บริษัทนิคคอน (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งแต่ เมษายน 2546 ถึง ธันวาคม 2548 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2548