

การประเมินผลของระบบบังคับเบรกด้วยไฟฟ้า โดยใช้ส่วนประกอบจริงร่วมกับมนุษย์

นางสาวปานัสม์ เอี่ยมวรพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

STEER-BY-WIRE SYSTEM EVALUATION BY
HUMAN-HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATOR

Ms. Panus lemvarapong

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

ปาดัสน์มึ เอ็ยมวรพงษ์ : การประเมึนผลของระบบบ้งคัับเล็ยวด้วยไฟฟ้า โดยใ้ ส่วนประกอบจรงร่วมกัับมนุษย์ (STEER-BY-WIRE SYSTEM EVALUATION BY HUMAN-HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATOR) อ.ที่ปรึษาวิทยานัพนธ์หลัค: ผศ.ดร.สัถนพศ จันทรานูว์ฒน์, อ.ที่ปรึษาวิทยานัพนธ์ร่วม: อ.ดร.นักลัษัถ์ นุ่มวงษ์, 150 หน้า.

ระบบบ้งคัับเล็ยวด้วยไฟฟ้า (Steer-by-Wire; SBW) เป็นการใช้ไฟฟ้าควคคุมแทนการใช้ขัันส่วนทวง กล ม้ว่ารระบบ SBW จะก่อใ้เก็ดผลดีในด้านการประหัดเช็อเพลง แต่กั้ทำให้ผู้ขัับสฎุเส็ยการรับร้รู้ ความร้รู้สั้กจากถนขณะขัับขั้ ซึ่งเป็นเหตุใ้ความเส็ยงในการเก็ดอุบตั้เหตุจากรการขัับขั้เพ็มขััน ดั่งนััน แนวทวงการทศอบด้วยวึวึ Hardware-In-the-Loop และ Human-In-the-Loop จั้เหมาะสมสั้หรับการ ทศอบระบบบ้งคัับเล็ยวด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถลดค่าความคลาดเคล็อนเน็องจากแบบจ้าลองทวง คณัิตศาสตรัที่ขัับขั้อน และมึการนำมนุษย์มาเป็นส่วนหนึ่ในการทศอบด้วย วิทยานัพนธ์ฉบับนั้ นำเสนอ การพัฒนาแนวทวงการทศอบ Human-Hardware-In-the-Loop (HHIL) ซึ่งประกอบด้วยเคร็องจ้าลองการ ขัับขั้ และขัันส่วนจรงของลั้อ ระบบรองร้บ และระบบบ้งคัับเล็ยว การจ้าลองพลศาสตรัยานยนต์เล็อกใช้ แบบจ้าลองรถยนต์แบบ 4 ลั้อ และประกุกตั้ใช้แบบจ้าลองแรงเส็ยคทานแบบ Dahl และแบบเช็งเส็นมาใช้ใน การสร้างแรงบัคที่พวงมัลยั เพื่อประเมึนผลระบบบ้งคัับเล็ยวด้วยไฟฟ้า โดยกำหนดใ้ใช้ั้ตราขายายแรงบัค ที่แตกต้งกัน ชุดทศอบ HHIL ที่พัฒนาขัันจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประมวผล 4 ชุดได้แก่ NI CompactRIO เป็นอุปกรณ์ประมวผลระดับรอง ทำหน้าที่ควคคุมการทำงานของขัันส่วนจรง และเคร็อง จ้าลองการขัับขั้, คอมพิวเตอร์แบบทำงานเวลจรง ทำหน้าที่จ้าลองแบบจ้าลองทวงคณัิตศาสตรัของยาน ยนต์ และใช้คอมพิวเตอร์ในการแสดงผลสภาพการขัับขั้และบ้นทึกแผนทึที่ใช้ทศอบ โดยใ้ภาษา C ในการ พัฒนาโปรแกรมร่วมกัับ OpenGL library จากการทศอบพบว่ั้ตราเร็วในการรับส่งขั้อมูลร่วมไปถึถึงการ ประมวผลค่าสั้งควคคุม ระบบ Hardware-In-the-Loop และระบบเคร็องจ้าลองการขัับขั้รถยนต์สามารถ ทำงานได้ที่ความเร็ว 500 และ 100 รอบต่อวึนาทึ ตามล้าดัับ แต่ด้วยขั้อจ้ากัดด้านอุปกรณ์ลั้อสาร ทำให้ ระบบท้งสองทำงานร่วมกันได้ที่ 20 รอบต่อวึนาทึ จากนั้นนำเสนอการใช้ชุดทศอบ HHIL เพื่อประเมึนระบบ บ้งคัับเล็ยวด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีแนวคัิดในการวึเคราะห์หาความยาก้งายในการขัับขั้และความล้่าที่เก็ดขััน เม็อ ขนาดของแรงบัคแตกต้งกัน โดยการประกุกตั้ใช้กฎของฟัิตส์ (Fitts' law) จากผลการทศอบพบว่ค่าความ คลาดเคล็อนจากรการขัับขั้จะลดลง นัันค็ือการขัับขั้จะ้งายขััน เม็อั้ตราขายายแรงบัคสูงขััน แต่ไม่พบผล เน็องจากความล้่าซึ่งต้องการการคัศึกษาเพ็มเติมในอนาคต

ภาควึชา.....วึศวกรรมเคร็องกล.....ลายม็ือช็ือนัลัิต.....
 สาขาवึชา.....วึศวกรรมเคร็องกล.....ลายม็ือช็ืออ.ที่ปรึษาวิทยานัพนธ์หลัค.....
 ปีการคัศึกษา.....2554.....ลายม็ือช็ืออ.ที่ปรึษาวิทยานัพนธ์ร่วม.....

5470276121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HARDWARE-IN-THE-LOOP / HUMAN-IN-THE-LOOP / STEER-BY-WIRE / FITTS' LAW

PANUS IEMVARAPONG: STEER-BY-WIRE SYSTEM EVALUATION BY HUMAN-HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATOR. ADVISOR : ASST. PROF. SUNHAPOS CHANTRANUWATHANA, Ph.D., CO-ADVISOR : NUKSIT NOOMWONGS, Ph.D., 150 pp.

Steer-by-Wire (SBW) system offers a number of benefits over conventional steering systems especially economics of fuel. This system uses the electrical connection between the steering wheel and the vehicle's wheels instead of mechanical ones. However, steering force feedback to the driver must be carefully generated to create useful road feeling. Therefore, to test a SBW system, a test rig with both Hardware-In-the-Loop and Human-In-the-Loop is desirable. This can decrease error from complicated mathematical models and can test interaction between the driver and the proposed SBW system. This thesis presents a development of Human-Hardware-In-the-Loop (HHIL) system which combines a driving simulator and a Hardware-In-the-Loop simulator that consists of tire, suspension, and steering system. Vehicle model and torque's model are used for generating road feeling via torque feedback at steering wheel. A linear approximated Dahl model and a linear model at different torque's gains are applied to evaluate torque feedback scheme of SBW system. NI CompactRIO and PC running real-time program (xPC) are chosen as the low level hardware controller and as the car's dynamic simulator respectively. A dedicate PC is also used for rendering visual environment, which was developed with C language and OpenGL library, and also for keeping and supplying data of the environment. HIL system and driving simulator system can run at 500 and 100 Hz, respectively. Because of the limitation of communication equipments, these two systems can operate together at 20 Hz. HHIL simulator is used for evaluate SBW system in which Fitts' law was applied to analyse the difficulty and fatigue of lane keeping task. The results show the relation between deviation from experiment's track and number of driving laps which can explain apparently the difficulty of driving. It is found that driving task is easier in general with more torque feedback. However, further study is needed for fatigue analysis.

DepartmentMechanical Engineering

Student's Signature

Field of StudyMechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year2011.....

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สัณห์ศ จันทรานุกัณณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ท่านทั้งสองได้กรุณาใช้เวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูง พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรเจริญ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านระบบสื่อสารประเภทต่างๆ การเขียนโปรแกรม NI LabVIEW[®] และโปรแกรม MATLAB[®] Simulink ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับกฎของฟิวด์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสมาคมยานยนต์แห่งประเทศไทยเป็นอย่างสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนแก่ผู้วิจัยในการนำเสนองานการวิจัยในระดับนานาชาติ ทั้งในและต่างประเทศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์และครูปฏิบัติการณ์ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลงได้ ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่และเพื่อนนิสิตมหาบัณฑิตทุกท่าน โดยเฉพาะนายกมล จึงเสถียรทรัพย์, นายจากรุบุตร คณะนัย และหม่อมหลวงรัตนพงษ์ ชยางกูร ที่มีส่วนร่วมให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยจะไม่สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงลงได้ หากปราศจากการสนับสนุนส่งเสริมจากบิดามารดาในทุกๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นการใช้เวลาดูแลห่วงใย สนับสนุนทุนทรัพย์ให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสศึกษาหาความรู้ ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำลังใจและความอบอุ่นที่มีให้ผู้วิจัยเสมอมา ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทัศนวิธานกรรม.....	4
2.1 ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2 แนวทางการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า.....	6
2.3 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware และ HIL-Human.....	14
2.3.1 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware.....	14
2.3.2 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Human.....	16
2.4 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HHIL.....	17
2.4.1 เครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เดิม (ชุดทดสอบ HIL-Hardware).....	17
2.4.2 เครื่องจำลองการขับที่รถยนต์เดิม (Driving Simulator; DS).....	20
2.5 การประเมินความยากง่ายของงานและความล่าช้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่.....	21
2.5.1 กฎของฟิตส์.....	22
2.5.2 การประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์กับการประเมินความยากง่ายในการขับขี่.....	24
2.6 บทสรุปจากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28

บทที่ 3 การพัฒนาชุดทดสอบ HHIL.....	29
3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของยานยนต์.....	29
3.2 ระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL.....	39
3.2.1 การพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ประมวล.....	40
3.2.2 การพิจารณาเลือกช่องทางในการรับ-ส่งข้อมูล.....	43
3.2.3 การทดสอบช่องทางสื่อสารหลักของชุดทดสอบ HHIL.....	45
3.2.3.1 การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232.....	46
3.2.3.2 การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP.....	50
บทที่ 4 การตรวจสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL	
และการประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้า.....	55
4.1 การตรวจสอบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL.....	55
4.1.1 ระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง	
และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่.....	59
4.1.2 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง	
และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่.....	60
4.1.3 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และ NI PXI Controller	
(ชุดทดสอบ HIL-Hardware).....	61
4.1.4 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, NI PXI Controller,	
คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ (HHIL)...	63
4.2 แนวทางการแก้ไขระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL.....	66
4.3 การใช้ชุดทดสอบเพื่อประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้า.....	68
4.3.1 การทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl....	69
4.3.1.1 แนวทางการทดสอบ.....	69
4.3.1.2 ผลที่ได้จากการใช้ชุดทดสอบ HHIL.....	70
4.3.2 การทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองแรงบิดเชิงเส้น..	74
4.3.2.1 แนวทางการทดสอบ.....	74
4.3.2.2 ผลที่ได้จากการใช้ชุดทดสอบ HHIL.....	75

บทที่ 5 บทสรุป	85
5.1 บทสรุป.....	85
5.2 งานวิจัยต่อเนื่องและข้อเสนอแนะ.....	90
5.3 การเผยแพร่ผลงานการวิจัย.....	90
5.3.1 การประชุมระดับนานาชาติ.....	91
5.3.2 การนำเสนอรูปแบบโปสเตอร์.....	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกฎของฟิตส์.....	96
ภาคผนวก ข รายละเอียดอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในชุดทดสอบHHIL.....	101
ภาคผนวก ค ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดสอบ	141
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการซ้ำซ้ำ.....	145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	150

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2-1	ขอบเขตในการทำงานของเครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์.....	19
ตารางที่ 3-1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับสมการที่ (3-23).....	35
ตารางที่ 3-2	ข้อกำหนดและพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองการเคลื่อนที่.....	38
ตารางที่ 3-3	เปรียบเทียบคุณสมบัติอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้งานอยู่เดิม.....	40
ตารางที่ 3-4	ผลการทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างNI CompactRIO และdSPACE....	49
ตารางที่ 3-5	ผลการทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างNI CompactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง.....	53
ตารางที่ 4-1	การแยกระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL.....	58
ตารางที่ 4-2	ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวเมื่อ ใช้ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5.....	71
ตารางที่ 4-3	ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวเมื่อ ใช้ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 (2).....	73
ตารางที่ 4-4	ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวพิจารณาต่อรอบการขับขึ้น.....	76
ตารางที่ 4-5	ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวเมื่อขับขึ้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	82
ตารางที่ ข-1	คุณสมบัติของ NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074.....	103
ตารางที่ ค-1	ลักษณะการบันทึกผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ เมื่อผู้ทดสอบขับขึ้นโดยใช้ชุดทดสอบ HHIL.....	143
ตารางที่ ง-1	ลักษณะการคำนวณค่าความผิดพลาดในการขับขึ้นเมื่อแบบจำลองแรงบิด ใช้ค่า $\beta=0.5$ ในการเลี้ยวครั้งที่ 3 (หน่วย: เมตร).....	148
ตารางที่ ง-2	ลักษณะการคำนวณค่าความผิดพลาดในการขับขึ้นเมื่อแบบจำลองแรงบิด ใช้ค่า $\beta=1.5$ ในการเลี้ยวครั้งที่ 2 (หน่วย: เมตร).....	149

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า.....	5
ภาพที่ 2-2 เปรียบเทียบแรงต้านการหมุนที่พวงมาลัยเชิงพาดิชัยกับแรงบิดอ้างอิง.....	6
ภาพที่ 2-3 การประมาณความสัมพันธ์ของแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัย องศาการหมุนพวงมาลัยและความเร็วของยานยนต์.....	8
ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ของแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัย องศาการหมุน พวงมาลัย และความเร็วของยานยนต์.....	8
ภาพที่ 2-5 แบบจำลองแรงเสียดทานของ Dahl (Dahl model).....	9
ภาพที่ 2-6 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงเทียบกับ ระยะการเปลี่ยนรูปของระบบรองรับ.....	10
ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงบิดเทียบกับองศาการเลี้ยว.....	11
ภาพที่ 2-8 ผลทดสอบการขับขี่โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดต้านการหมุนที่ พวงมาลัยกับองศาการเลี้ยวเป็นลักษณะเชิงเส้น.....	12
ภาพที่ 2-9 การทดสอบโดยใช้เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์.....	13
ภาพที่ 2-10 ลักษณะแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัยที่มีขนาดอัตราขยายต่างๆกัน..	13
ภาพที่ 2-11 แผนภาพการทดสอบด้วยวิธีการแบบ HIL-Hardware.....	15
ภาพที่ 2-12 เครื่องจำลองการขับขี่ใน 3 ระดับขั้นเสรีโดยใช้ อุปกรณ์เชิงเส้นเป็นอุปกรณ์ขับ.....	16
ภาพที่ 2-13 แผนผังการทำงานของเครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์.....	18
ภาพที่ 2-14 ระบบควบคุมหลักของชุดทดสอบ HIL-Hardware.....	18
ภาพที่ 2-15 แผนผังรับ-ส่งข้อมูลภายในระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์.....	20
ภาพที่ 2-16 แผนผังการทำงานของระบบจำลองการขับขี่รถยนต์เดิม.....	21
ภาพที่ 2-17 การทดลองกฎของฟิตส์.....	22
ภาพที่ 2-18 เส้นการถดถอยของกฎของฟิตส์.....	23
ภาพที่ 2-19 รูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างค่าความผิดพลาดและ ค่าอัตราขยายการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย.....	25
ภาพที่ 2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าอัตราขยาย การสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย.....	26

ภาพที่ 2-21	แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับเคลื่อนครั้งแรก.....	27
ภาพที่ 2-22	แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับเคลื่อนที่สอง.....	27
ภาพที่ 2-23	แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับเคลื่อนท้าย.....	28
ภาพที่ 3-1	แบบจำลองยานยนต์.....	30
ภาพที่ 3-2	มุมลื่นไถลที่เกิดขึ้นที่แต่ละล้อ.....	34
ภาพที่ 3-3	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมลื่นไถล และแรงด้านข้าง.....	34
ภาพที่ 3-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ_i และ อัตราการลื่นไถล λ_i	36
ภาพที่ 3-5	การถ่ายเทน้ำหนักเมื่อเกิดการเร่งหรือเบรก.....	36
ภาพที่ 3-6	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมเลี้ยวที่ได้จากแบบจำลอง สมการพิเศษ (เส้นประ) และแบบจำลอง Dahl ที่ประมาณความสัมพันธ์ แบบเชิงเส้น(เส้นทึบ).....	39
ภาพที่ 3-7	แผนผังการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยใช้ อุปกรณ์ประมวลผลหลักเป็น dSPACE.....	42
ภาพที่ 3-8	แผนผังการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยใช้ อุปกรณ์ประมวลผลหลักเป็นคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง.....	43
ภาพที่ 3-9	โปรแกรมที่ใช้เพื่อการทดสอบ ซึ่งถ่ายโอนไปที่ NI CompactRIO.....	47
ภาพที่ 3-10	โปรแกรมที่ใช้เพื่อการทดสอบ ซึ่งถ่ายโอนไปที่ dSPACE.....	48
ภาพที่ 3-11	โปรแกรม ControlDesk ที่เป็นสื่อกลางระหว่างผู้ใช้งานกับ dSPACE.....	48
ภาพที่ 3-12	การแสดงผลลักษณะการขับเคลื่อนที่ใช้โปรแกรมMicrosoft Visual Studio...	51
ภาพที่ 4-1	แผนผังระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยรวม.....	56
ภาพที่ 4-2	ลักษณะสัญญาณมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย และเส้นทางการวิ่งของยานยนต์ที่ จำลองขึ้นสำหรับทดสอบระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับเคลื่อน.....	59
ภาพที่ 4-3	ลักษณะเส้นทางการวิ่งของยานยนต์สำหรับทดสอบระบบสื่อสาร ระหว่าง NI compactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง.....	60
ภาพที่ 4-4	ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการขับเคลื่อนผ่านเครื่องจำลองการขับเคลื่อน.....	61

ภาพที่ 4-5	ชุดทดสอบ HIL-Hardware ที่ประกอบด้วยยาง ระบบบังคับเลี้ยว และระบบรองรับ.....	62
ภาพที่ 4-6	ผลการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองของยาง (Tire model) โดยใช้ชุดทดสอบ HIL-Hardware.....	62
ภาพที่ 4-7	ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 30มิลลิวินาที (33.3 Hz).....	64
ภาพที่ 4-8	ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 40 มิลลิวินาที(25 Hz).....	64
ภาพที่ 4-9	ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 50 มิลลิวินาที (20 Hz).....	64
ภาพที่ 4-10	ผลการทดสอบระบบ HHIL ที่ความเร็ว 30 มิลลิวินาที.....	65
ภาพที่ 4-11	ผลการทดสอบระบบ HHIL ที่ความเร็ว 50 มิลลิวินาที.....	65
ภาพที่ 4-12	ระบบสื่อสารแบบหลายเครือข่าย.....	67
ภาพที่ 4-13	ลักษณะแบบจำลอง Dahl เมื่อ β ซึ่งมีค่า 0.5 และ1.5ตามลำดับ.....	69
ภาพที่ 4-14	ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ใช้ทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า.....	70
ภาพที่ 4-15	ผลการทดสอบเมื่อใช้แบบจำลอง Dahl ที่ตัวแปร β ซึ่งมีค่า 0.5และ1.5.....	70
ภาพที่ 4-16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขั้วซี่.....	71
ภาพที่ 4-17	ผลการทดสอบเมื่อใช้แบบจำลอง Dahl ที่ตัวแปร β ซึ่งมีค่า 0.5และ1.5 (2).....	72
ภาพที่ 4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขั้วซี่.....	74
ภาพที่ 4-19	ลักษณะของแรงบิดเมื่ออัตราขยายมีค่า K1, K2, K3 และ K4.....	75
ภาพที่ 4-20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขั้วซี่ของคนที่ 1.....	76
ภาพที่ 4-21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขั้วซี่ของคนที่ 1 เมื่อ K1=1.5 นิวตันเมตรต่อองศา.....	77
ภาพที่ 4-22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขั้วซี่ของคนที่ 1 เมื่อ K2=2.0 นิวตันเมตรต่อองศา.....	77

ภาพที่ 4-23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 1 เมื่อ $K3=2.5$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	77
ภาพที่ 4-24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 1 เมื่อ $K4=3.0$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	78
ภาพที่ 4-25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 2.....	78
ภาพที่ 4-26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 2 เมื่อ $K1=1.5$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	78
ภาพที่ 4-27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 2 เมื่อ $K2=2.0$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	79
ภาพที่ 4-28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 2 เมื่อ $K3=2.5$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	79
ภาพที่ 4-29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่งของคนี่ 2 เมื่อ $K4=3.0$ นิวตันเมตรต่อองศา.....	79
ภาพที่ 4-30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับส่วนกลับของอัตราขยาย.....	81
ภาพที่ 4-31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่จับชั่ง เมื่อจับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	83
ภาพที่ ก-1	ลักษณะการเคลื่อนที่ที่พีดีพิจารณาใช้.....	97
ภาพที่ ข-1	อุปกรณ์ประมวลผล NI CompactRIO.....	102
ภาพที่ ข-2	Tool box for block diagram.....	104
ภาพที่ ข-3	Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232....	105
ภาพที่ ข-4	Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232.....	106
ภาพที่ ข-5	Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP.....	107
ภาพที่ ข-6	Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP.....	108
ภาพที่ ข-7	Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานชุดทดสอบ HHIL.....	109

ภาพที่ ข-8	Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงาน ชุดทดสอบ HHIL.....	110
ภาพที่ ข-9	อุปกรณ์ประมวลผล NI PXI Controller.....	111
ภาพที่ ข-10	NI PXI Chassis.....	111
ภาพที่ ข-11	Embedded Controller.....	112
ภาพที่ ข-12	Front Panel สำหรับโปรแกรมที่ใช้สอบเทียบค่าแรง และแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด.....	113
ภาพที่ ข-13	Block Diagram สำหรับโปรแกรมที่ใช้สอบเทียบค่าแรง และแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด.....	114
ภาพที่ ข-14	คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง.....	115
ภาพที่ ข-15	Intel® PRO/1000 GT Desktop Adapter chipset 8355x.....	116
ภาพที่ ข-16	Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target.....	117
ภาพที่ ข-17	Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target ส่วนของ Receive Subsystem.....	118
ภาพที่ ข-18	Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target ส่วนของ Vehicle Model..	119
ภาพที่ ข-19	แบบจำลองแปลงความเร่งเป็นแรงบิดขับและการแปลงตำแหน่ง บนแกนอ้างอิงโลก.....	120
ภาพที่ ข-20	แบบจำลองการแปลงมุมเล็กน้อยที่พวงมาลัยเป็นมุมเล็กน้อยที่ล้อ.....	121
ภาพที่ ข-21	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าซ้าย.....	122
ภาพที่ ข-22	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าขวา (2).....	123
ภาพที่ ข-23	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าขวา.....	124
ภาพที่ ข-24	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าขวา (2).....	125
ภาพที่ ข-25	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังซ้าย.....	126
ภาพที่ ข-26	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังซ้าย (2).....	127
ภาพที่ ข-27	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังขวา.....	128
ภาพที่ ข-28	แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังขวา (2).....	129
ภาพที่ ข-29	แบบจำลองพลศาสตร์.....	130
ภาพที่ ข-30	แบบจำลองแรงบิดด้วย Dahl model.....	131

ภาพที่ ข-31	แบบจำลองมุมลื่นไถล และการจำกัดความเร็วสูงสุด.....	132
ภาพที่ ข-32	การตั้งค่าการประมวลผลของโปรแกรม Simulink.....	133
ภาพที่ ข-33	การสร้าง xPC target ที่ใช้ในการประมวลผลแบบจำลองยานยนต์ แบบเวลาจริง.....	133
ภาพที่ ข-34	คอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่.....	134
ภาพที่ ง-1	เส้นทางการขับขี่ที่กำหนดเพื่อทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า.....	146
ภาพที่ ง-2	ลักษณะการหาค่าความผิดพลาดจากการขับขี่.....	146

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการพัฒนาและผลิตรายานยนต์ การทดสอบระบบต่างๆในยานยนต์เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำทุกครั้งก่อนการผลิตจริง เนื่องจากยานยนต์เป็นพาหนะที่นิยมใช้มากที่สุดในการคมนาคม ซึ่งเปรียบเสมือนปัจจัยหลักในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ปัจจุบัน การออกแบบและผลิตรายานยนต์ที่ผ่านมามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นให้ได้ยานพาหนะที่สามารถนำมาใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การทดสอบเพื่อตรวจหาข้อผิดพลาดต่างๆของระบบก่อนนำยานยนต์นั้นไปใช้จริง ดังนั้น ผลจากการทดสอบด้วยแนวทางการทดสอบยานยนต์ที่ดีและเสมือนจริง จะนำมาซึ่งการวิเคราะห์หาทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แนวทางการทดสอบยานยนต์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในวงการยานยนต์ปัจจุบันคือ วิธี Hardware-In-the-Loop (HIL-Hardware) และ Human-In-the-Loop (HIL-Human)* ซึ่งแต่เดิมใช้การทดสอบยานยนต์โดยการจำลองยานยนต์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แทนที่การใช้ยานยนต์จริงทั้งคัน และการใช้มนุษย์ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบลง และเพิ่มความปลอดภัยในการทดสอบได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวในบางระบบที่มีความซับซ้อน หรือต้องการผลการตอบสนองของมนุษย์ ยังไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร

แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware นั้น เป็นการนำอุปกรณ์หรือระบบย่อยที่สนใจมาทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่แทนอุปกรณ์ส่วนอื่นๆในระบบใหญ่ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยที่อุปกรณ์หรือระบบย่อยนั้นๆ มักเป็นระบบที่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ ที่ทำให้ไม่สามารถทดสอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวได้ ข้อดีของการทดสอบแบบ HIL-Hardware นี้คือ ไม่จำเป็นต้องสร้างระบบจริงทั้งหมดเพื่อทำการทดสอบระบบย่อยเพียงบางประการ สามารถทำการทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ ทำให้การควบคุมสิ่งแวดล้อมหรือตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อระบบที่ต้องการทดสอบทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการทดสอบซ้ำที่ถี่ขึ้นจะทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการทดสอบระบบจริงทั้งระบบ

*เนื่องจากตัวย่อ Hardware-In-the-Loop และ Human-In-the-Loop เหมือนกัน คือ HIL ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขอใช้ HIL-Hardware และ HIL-Human แทน Hardware-In-the-Loop และ Human-In-the-Loop ตามลำดับ

แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Human นั้น เป็นการนำมนุษย์หรือผู้ขับขี่เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการทดสอบ เนื่องจากการทำงานบางระบบ ต้องใช้การตัดสินใจและการตอบสนองของมนุษย์ควบคุมการทำงาน ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์และลักษณะนิสัยของผู้ขับขี่ ส่วนสำคัญของแนวทางการทดสอบนี้คือ ส่วนที่ติดต่อกับผู้ขับขี่ นั่นคือ การจำลองสถานการณ์การขับขี่ ซึ่งใช้การจำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของยานยนต์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจำลองสภาพการมองเห็นขณะขับขี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จุดเด่นของการทดสอบแบบ HIL-Human นี้คือ ผู้ขับขี่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการทดสอบ ทำให้สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมและการขับขี่ของมนุษย์ในสถานการณ์ใดๆได้ นิยมนำมาใช้เพื่อฝึกหรือเพิ่มประสบการณ์ก่อนการขับขี่จริง นอกจากนี้ยังสามารถนำมาตรวจสอบผลกระทบต่อการขับขี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระบบใดๆในยานยนต์ ซึ่งสามารถทำได้ง่าย ปลอดภัย และประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายมากกว่าการขับขี่ในสนามทดสอบจริง

จากข้อดีของแนวทางการทดสอบด้วยวิธี HIL-Hardware และ HIL-Human ที่กล่าวมาในข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาการพัฒนาแนวทางการทดสอบแบบ Human-Hardware-In-the-Loop (HHIL) ซึ่งเป็นการนำแนวทางการทดสอบทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน เพื่อตอบโจทย์การทดสอบระบบที่ต้องการทั้งชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์จริง และการตอบสนองและตัดสินใจของผู้ขับขี่ขณะทำการทดสอบ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอตัวอย่างการใช้เครื่องทดสอบดังกล่าวในการประเมินการสร้างแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัยของระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า (Steer-by-Wire: SBW) ซึ่งจะทำหน้าที่แทนความรู้สึกที่มาจากถนน โดยจะประเมินความยากง่ายและความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่เมื่อมีขนาดแรงบิดต้านที่พวงมาลัยต่างกัน

การพัฒนาแนวทางการทดสอบ HHIL จะพัฒนาจากงานวิจัยเดิม นั่นคือ เครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ HIL-Hardware เพื่อศึกษาการตรวจวัดแรงที่ล้อ และเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ (Driving Simulator) ซึ่งนำมาพัฒนาเพื่อศึกษาผลของการโคลงที่มีต่อการเลี้ยว โดยนำมาพัฒนาให้ใช้แบบจำลองยานยนต์แทนการใช้แบบจำลองยานยนต์สองล้อ หรือแบบจำลองจักรยานเดิม (Bicycle Model) และใช้อุปกรณ์ประมวลผลหลักร่วมกัน ในขณะที่โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการขับขี่ พัฒนาโดยผู้ร่วมงานวิจัยเครื่องจำลองการขับขี่ที่เน้นไปในการประหยัดน้ำมัน เมื่อพัฒนาชุดทดสอบ HHIL แล้ว จะนำเสนอการประเมินระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาความยากง่ายและความล้าจากการขับขี่ ด้วยการประยุกต์กฎของฟิตส์ (Fitts' Law)

1.2 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักคือพัฒนาชุดทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HHIL ซึ่งประกอบไปด้วยชุดทดสอบแบบ HIL-Hardware และ HIL-Human ที่มาทำงานร่วมกันจากนั้นจึงนำเสนอการประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้าด้วยการประยุกต์กฎของฟิตส์ ด้านความยากง่ายและความล่าช้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่เมื่อขนาดแรงบิดต้านที่พวงมาลัยต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างชุดทดสอบระบบ SBW ด้วยแนวทางการทดสอบยานยนต์วิธี HHIL โดยการประยุกต์นำแนวทางการทดสอบแบบ HIL ที่ประกอบด้วยระบบรองรับและบังคับด้วยจริงของยานยนต์ขนาดเล็ก ให้ทำงานร่วมกับเครื่องจำลองการขับขี่

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการแนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware และ HIL-Human ที่เกี่ยวกับการทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้าในยานยนต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา
2. ศึกษาการทำงานของระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เดิม และเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์เดิม ในด้านการทำงาน และการควบคุม
3. ออกแบบระบบสื่อสารที่ใช้ควบคุมการทำงานระหว่างระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ และเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์เพื่อพัฒนาเป็นชุดทดสอบ HHIL
4. พัฒนาชุดทดสอบ HHIL ที่ได้ออกแบบไว้รวมไปถึงพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมชุดทดสอบ HHIL
5. ตรวจสอบการทำงานของชุดทดสอบ HHIL
6. ทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบ HHIL และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้านความยากง่ายของงานและความล่าช้าที่เกิดขึ้น โดยประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ชุดทดสอบ HHIL ที่พัฒนาขึ้นขึ้น สามารถใช้ทดสอบและประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้าได้
2. สามารถประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ในการประเมินความยากง่ายของงานและความล่าช้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ด้วยระบบบังคับด้วยไฟฟ้าได้ ซึ่งผลที่ได้นำไปสู่การพัฒนาบบบังคับด้วยไฟฟ้าในลำดับต่อไป

บทที่ 2

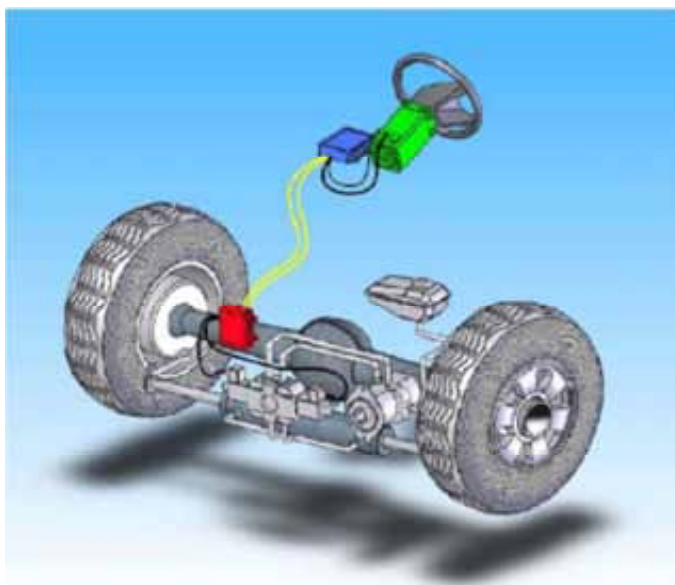
ปริทัศน์วรรณกรรม

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาและสร้างชุดทดสอบด้วยชิ้นส่วนจริงร่วมกับมนุษย์ (Human-Hardware-In-the-Loop; HHIL) โดยจะนำชุดทดสอบดังกล่าวไปใช้ในการศึกษาและประเมินผลระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า ในด้านแรงบิดที่พวงมาลัยที่มีผลต่อความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า, แนวทางการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า, แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware และ HIL-Human, แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HHIL, และการประเมินความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับ

2.1 ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า

จุดเริ่มในการพัฒนาระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า เริ่มจากการพัฒนาระบบ active steering โดยมีการสร้างแรงบิดเพิ่มเติมที่พวงมาลัยในระบบบังคับเลี้ยวปกติ เพื่อป้องกันและหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากการรับรู้ถนนที่ไม่เพียงพอ เช่น รถยนต์ BMW 5-Series ปี 2004 เป็นต้น แต่เนื่องจากการพัฒนาดังกล่าวมีข้อจำกัดอยู่ที่ลักษณะทางกลของระบบบังคับเลี้ยว จึงเกิดแนวคิด การแทนที่ชิ้นส่วนทางกลด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบการบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาด้าน Drive by Wire (DBW) ที่มีการพัฒนาและใช้งานมาก่อนหน้าในงานด้านอากาศยาน เช่น Navy F-8C Crusader เป็นต้น [1] ซึ่งงานดังกล่าว กลายเป็นการเปิดโอกาสแนวทางการพัฒนาให้ประสิทธิภาพในงานด้านอากาศยานเพิ่มขึ้นในเวลาต่อมา

การพัฒนาในวงการทางด้านรถยนต์ มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนระบบเชิงกล (mechanical system) ให้เป็นการควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า (electronic wire) ซึ่งมีประโยชน์อย่างชัดเจนในด้านความสะดวกในการใช้งาน การปรับเปลี่ยน และการพัฒนาการทำงานของระบบ อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้อีกด้วย โดยระบบการบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้ามีแนวคิดหลักอยู่ที่การเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อบริเวณระหว่างพวงมาลัยกับล้อ จากระบบทางกลให้เป็นระบบที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า [2][3][4][5] ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า[6]

การพัฒนา ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้ามีมาอย่างต่อเนื่อง โดยข้อดีของระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้ามีอยู่หลายประการ ดังนี้

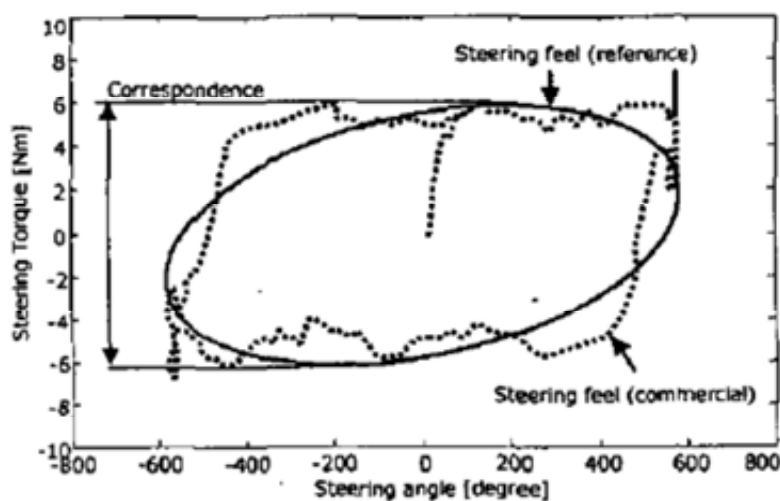
- ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า มีประสิทธิภาพด้านการประหยัดเชื้อเพลิงมากกว่าระบบบังคับเลี้ยวเชิงกล ซึ่งเป็นการลดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน เนื่องจากระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าช่วยลดน้ำหนักในรถยนต์โดยการนำตัวแกนหมุนพวงมาลัยออก [2][3][4][7]
- ลดความรุนแรงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากการกระแทกของร่างกายกับชิ้นส่วนของกลไกการบังคับเลี้ยวเมื่อเกิดการชน เพราะระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าไม่มีชิ้นส่วนเชิงกล แต่ถูกแทนที่ด้วยระบบทางไฟฟ้าแล้วทั้งหมด ดังที่กล่าวข้างต้น [2][6]
- ลดการเกิดการสั่นสะเทือน เสียงเนื่องจากน้ำมันไฮดรอลิก (hydraulic pump) ออกไป [7]

อย่างไรก็ตาม ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าก็มีข้อเสียเนื่องจากการไร้ซึ่งแรงบิดต้านกลับที่พวงมาลัย หรือการรับรู้สภาพของถนนขณะขับขี่ (road feel) ซึ่งอาจทำให้ผู้ขับเกิดความเบื่อหน่ายในการขับ และบางครั้งอาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุเนื่องจากความไม่ใส่ใจขณะขับขี่ [4][8] ดังนั้น จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัยอย่างเหมาะสม เพื่อให้ผู้ขับที่รับรู้ถึงสภาพการขับขี่ในขณะนั้นๆ อย่างไรก็ตาม อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ ความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้นเมื่อขับขี่เป็นเวลานาน เมื่อแรงบิดที่พวงมาลัยมากเกินไปจนความจำเป็น ดังนั้นแรงบิดที่เหมาะสมจะทำ

ให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมยานยนต์ได้เป็นอย่างดี และไม่เกิดความล้าหรือเกิดน้อย เมื่อขับขี่เป็นเวลานาน

2.2 แนวทางการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า

การสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยนั้น ขนาดของแรงบิดที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มที่จะสร้างให้มีลักษณะคล้ายการขับขี่ด้วยระบบบังคับเลี้ยวแบบปกติ (การบังคับเลี้ยวทางกล) ซึ่งเป็นเหตุให้มีความวิจัยมากมายมุ่งเน้นไปที่การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยได้เสมือนระบบบังคับเลี้ยวปกติ การสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยนั้น นิยมเลือกใช้มอเตอร์ติดที่พวงมาลัย เพื่อสร้างแรงบิดไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการบังคับเลี้ยว โดยที่ขนาดของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยแตกต่างกันไปตามลักษณะที่มาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ Jang, S.H., Park, T.J. และ Han, C.S. [2] ได้เสนอการควบคุมการสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งบริเวณพวงมาลัย เพื่อพัฒนาการขับขี่ให้เกิดความปลอดภัย จากการควบคุมอัตราการ yaw ของยานยนต์ หรือ yaw rate โดยใช้แนวโน้มการรับรู้แรงต้านที่พวงมาลัยของผู้ขับขี่เชิงพาณิชย์ (commercial) ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงสถิติอ้างอิงในการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้การสร้างบิดย้อนกลับที่พวงมาลัยนี้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จึงมีการนำแนวทางการทดสอบ HIL-Hardware เข้ามาใช้ในการศึกษาระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า จากการตรวจวัดค่าแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยที่มอเตอร์บริเวณพวงมาลัยและแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ล้อหน้าของชุดทดสอบ HIL-Hardware พบว่ามีความใกล้เคียงกันพอสมควร และสามารถให้แรงบิดที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองในการควบคุม yaw rate ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง



ภาพที่ 2-2 เปรียบเทียบแรงต้านการหมุนที่พวงมาลัยเชิงพาณิชย์กับแรงบิดอ้างอิง[2]

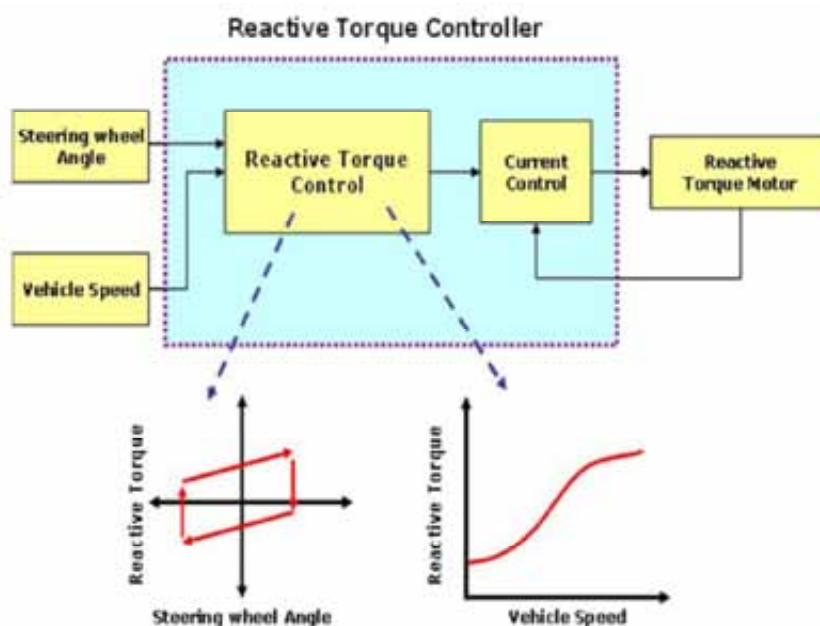
งานวิจัยของ Amberkar, S., Bolourchi, F., Demerly, J. และ Millisap, S.[9] นำเสนอ การสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยโดยใช้ค่าแรงบิดที่วัดได้จริงบริเวณกระปุกเกียร์ (gearbox) มาใช้ในการควบคุมตำแหน่งของล้อ เพื่อให้มีแรงเกิดขึ้นระหว่างล้อกับพื้นถนน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Frederick, M.D.[4] ที่ใช้วิธีการตรวจวัดแรงที่บริเวณกระปุกเกียร์ของ ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมตำแหน่งของพวงมาลัยมาใช้ในการคำนวณบน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการสร้างแรงบิดที่เหมาะสมที่ พวงมาลัยเพื่อให้ผู้ขับขี่รับรู้ถึงสภาพการณ์ขณะขับขี่ โดยการเปรียบเทียบค่าแรงบิดด้านการหมุนที่ พวงมาลัยนั้นพิจารณาจากการตอบสนองของผู้ขับขี่

จากงานวิจัยที่อาศัยการสร้างโมเดลจากค่าแรงบิดจริงที่วัดได้ ทั้งจากการขับขี่จริงและชุด ทดสอบ HIL-Hardware ในทำนองเดียวกัน Kim, C.L., Jang, J.H., Oh, S.K., Lee, J.Y., Han, C.S. และ Hedrick, J.K.[10] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัย องค์ การหมุนพวงมาลัย และความเร็วรถ ซึ่งพัฒนาการสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยจาก แบบจำลองระบบบังคับเลี้ยวขณะที่รถจอดและวิ่งที่ความเร็วสูง โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของ แรงบิด มุมเลี้ยวและความเร็วของยานยนต์ ดังภาพที่ 2-3 ประมาณความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับ มุมเลี้ยว และแรงบิดกับความเร็วยานยนต์ ได้ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ

$$\tau_v = -K_\beta v^2 \left(\frac{1}{3} v - \frac{1}{2} V_{max} \right) + T_{in} \quad (2-1)$$

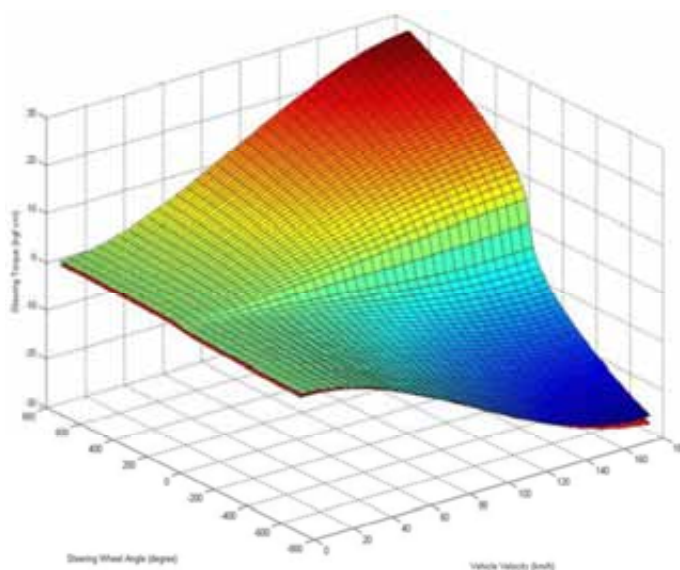
$$\tau_\theta = K_\alpha \sqrt{|\theta_{sw}|} \text{sgn} \theta_{sw} \quad (2-2)$$

เมื่อ τ_v	คือ แรงบิดเนื่องจากความเร็วของยานยนต์
v	คือ ความเร็วของยานยนต์
	คือ ความเร็วสูงสุด
T_{in}	คือ แรงบิดเริ่มต้น
τ_θ	คือ แรงบิดเนื่องจากมุมเลี้ยวที่ล้อ
θ_{sw}	คือ มุมเลี้ยวที่ล้อ
K_β และ K_α	คือ ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการสร้างแรงบิดเนื่องจากความเร็ว ยานยนต์ และมุมเลี้ยวที่ล้อ ตามลำดับ



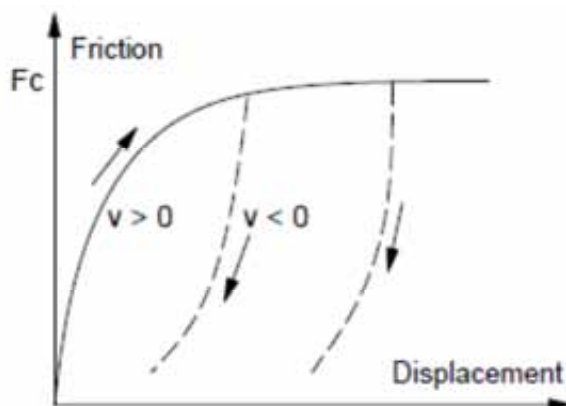
ภาพที่ 2-3 การประมาณความสัมพันธ์ของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัย องศาการหมุนพวงมาลัยและความเร็วของยานยนต์[10]

โดยเมื่อจำลองค่าแรงบิดจากสมการดังกล่าว พบว่าความสัมพันธ์ของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัย องศาการหมุนพวงมาลัย และความเร็วของยานยนต์ มีลักษณะดังภาพที่ 2-4 จากการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบค่าแรงบิดดังกล่าวจากค่าจริงที่ได้จากการทดสอบซ้ำที่จริง พบว่าค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงใกล้เคียงกับค่าแรงบิดที่ได้จากการจำลองผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้



ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัย องศาการหมุนพวงมาลัยและความเร็วของยานยนต์[10]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่พวงมาลัย และมุมเลี้ยวล้อที่เกิดขึ้นจริง มีลักษณะคล้ายวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) Carlos, C.W., Panagiotis, T., Efstathios, V., Michel, B. และ Gerard, G. ได้นำเสนอลักษณะของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ล้อและยางที่ติดตามแนวยาง โดยใช้แบบจำลองแรงเสียดทานของ Dahl (Dahl model) [11] มาใช้ในการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แบบจำลองแรงเสียดทานของ Dahl (Dahl model)[11]

โดยรูปแบบของแรงเสียดทานดังกล่าว เกิดจากการใช้แบบจำลอง Dahl ดังแสดงในสมการที่(2-3)

$$\frac{dF}{dt} = \sigma_0 v_r \left(1 - \frac{F}{F_c} \operatorname{sgn}(v_r) \right)^\beta \quad (2-3)$$

เมื่อ	v_r	คือความเร็วสัมพัทธ์
	F	คือแรงเสียดทาน
	F_c	คือแรงเสียดทานสูงสุด
	σ_0	คือสัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่ง
	β	คือตัวแปรปรับปรุงรูปร่างของกราฟ stress-strain (นิยมใช้ $\beta = 1$)

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Saelem, S., Chantranuwathana, S., Panichanun, K., Prempreeda, P., Wichienprakarn, P. และ Kruo-ongarjnkool, P.[12] มีการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำที่ระบบรองรับและระยะการเปลี่ยนรูปของระบบรองรับ (deflection) โดยปรับปรุงแบบจำลอง Dahl ให้เป็นสมการเชิงเส้นอย่างง่าย เพื่อใช้ในการทดสอบระบบรองรับ ดังแสดงในสมการที่ (2-4) และ (2-5)

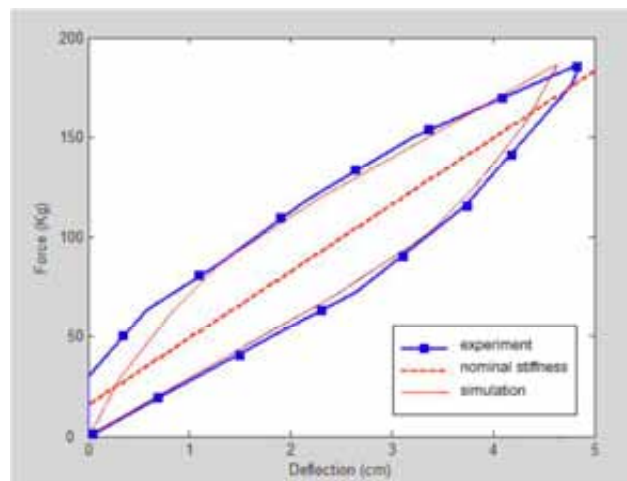
$$\frac{dF}{dt} = \sigma_0 v_r (h - F \operatorname{sgn}(v_r))^\beta \quad (2-4)$$

$$h = \frac{1}{2} [(h_u + h_l) \operatorname{sgn}(v_r) + (h_u - h_l)] \quad (2-5)$$

เมื่อ $h_u(v_r) = av_r + b$
 $h_l(v_r) = dv_r + e$

- เมื่อ h_u คือ ขอบเขตบนของวงฮีสเทอรีซิสหรือแรงสูงสุดที่มากกระทำระบบ
 h_l คือ ขอบเขตล่างของวงฮีสเทอรีซิส หรือแรงต่ำสุดที่มากกระทำระบบ
 F คือ แรงที่มากกระทำระบบรองรับ
 v_r คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูป หรือระยะของการเปลี่ยนแปลงรูปของระบบรองรับ
 σ_0 คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งของระบบรองรับ
 a, b, d, e, β คือ ตัวแปรปรับปรุงรูปร่างของกราฟ

ซึ่งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวให้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่กระทำที่ระบบรองรับและระยะการเปลี่ยนแปลงรูปของระบบรองรับ คล้ายกับวงฮีสเทอรีซิส ดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงเทียบกับระยะการเปลี่ยนแปลงรูปของระบบรองรับ[12]

ดังนั้น จึงอาจใช้สมการ (2-4) และ (2-5) แทนการใช้สมการ Dahl โดยตรงได้ โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์แบบฮีสเทอรีซิสที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆกันได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ ลักษณะความสัมพันธ์แบบฮีสเทอรีซิสนั้น Pacejka, H.B. เสนอสมการพิเศษ (Magic Formula)[13] ที่

ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเล็กน้อยกับแรงบิดที่เกิดขึ้น ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์นี้มีลักษณะที่คล้ายกับรูปแบบของแบบจำลองDahl ดังแสดงในสมการที่ (2-6) – (2-8)

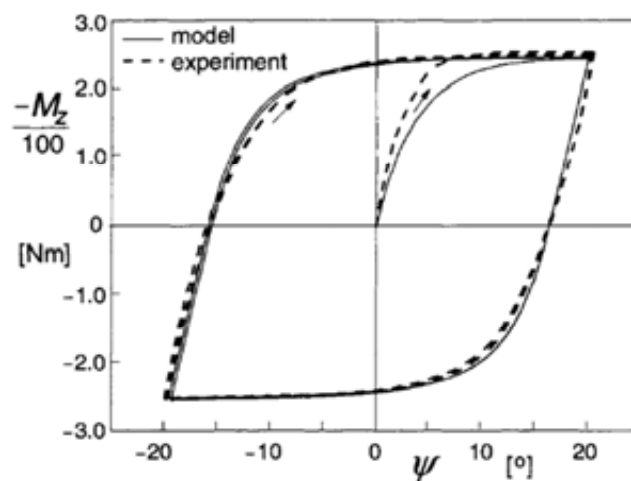
$$\dot{\phi} = -\left(1 - \rho \left| \frac{M_{z\psi}}{M_{z\psi\infty}} \right|^{c_0}\right) \psi \quad (2-6)$$

$$M_{z\psi} = C_{M\psi} \phi \quad (2-7)$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & ; \text{sgn}\phi \neq -\text{sgn}\dot{\psi} \\ 1 & ; \text{sgn}\phi = -\text{sgn}\dot{\psi} \end{cases} \quad (2-8)$$

เมื่อ ϕ	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเล็กน้อยที่ล้น
ψ	คือ มุมเล็กน้อยที่ล้น
$M_{z\psi}$	คือ แรงบิดที่กระทำที่ระบบ
$M_{z\psi\infty}$	คือ แรงบิดสูงสุดที่กระทำที่ระบบ
$C_{M\psi}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบิดของยาง
ρ	คือ ตัวแปร laplace (laplace variable)

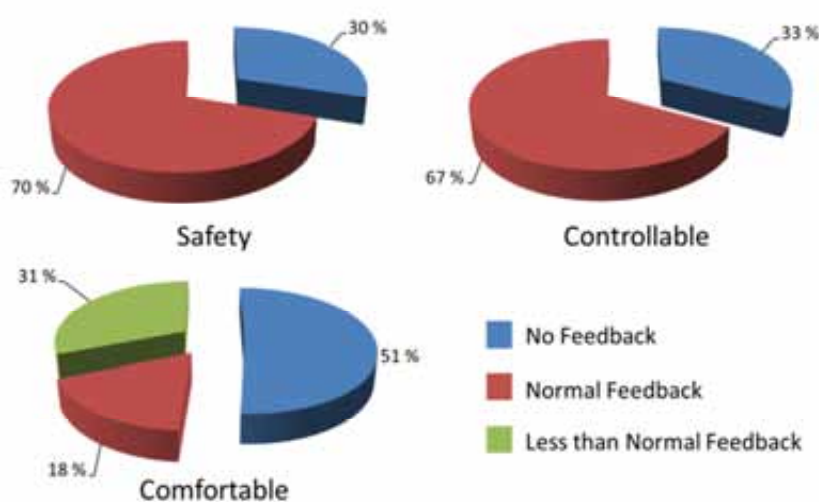
จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงบิดเทียบกับองศาการเลี้ยว ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงบิดเทียบกับองศาการเลี้ยว[13]

เพื่อตรวจสอบการรับรู้สภาพถนนของผู้ขับขี่ จึงมีการใช้แนวทางการทดสอบแบบ HIL-Human ดังเช่นงานวิจัยของ เอกพงศ์ ธีระวร, ชยุตม์ ลิ้มปิผลไพบูลย์, ทศพร เหลืองวิไลย์, ธนพล พุกวัฒน์นะ, นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์[14] ซึ่งเสนอการสร้างแรงบิดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มาจากการจำลองลักษณะของยางและกลไกการบังคับเลี้ยว โดยประมาณค่าแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นที่ล้น มุมลื่นไถล (slip angle) ซึ่งรูปแบบของแรงบิดดังกล่าว

เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น สำหรับการขับขี่แบบทั่วไปที่ความเร็วปานกลางถึงสูง และใช้การประเมินความรู้สึกของขับขี่จากแบบสอบถามจำนวน 15 คน พบว่าเมื่ออัตราการขยาย (gain) ของแรงบิดป้อนกลับเพิ่มขึ้นจะทำให้ผู้ขับขี่รับรู้ถึงพื้นถนนมากขึ้น ทำให้สามารถควบคุมยานยนต์ได้ แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ผู้ขับขี่เกิดความล้ามากกว่าการใช้อัตราการขยายของแรงบิดต่ำ อย่างไรก็ตามหากไม่มีแรงบิดที่พวงมาลัย (อัตราการขยายเป็นศูนย์) จะพบว่าไม่สามารถควบคุมยานยนต์ได้ดีเท่าที่ควร ผลการทดสอบการขับขี่แสดงในภาพที่ 2-8 ซึ่งการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในงานวิจัยชิ้นนี้อาจไม่เสมือนจริงนัก เนื่องจากมอเตอร์ที่พวงมาลัยสามารถสร้างแรงบิดสูงสุดได้เพียง 4 นิวตัน-เมตร ในขณะที่แรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยที่เกิดขึ้นจริง ควรจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 8 นิวตัน-เมตร



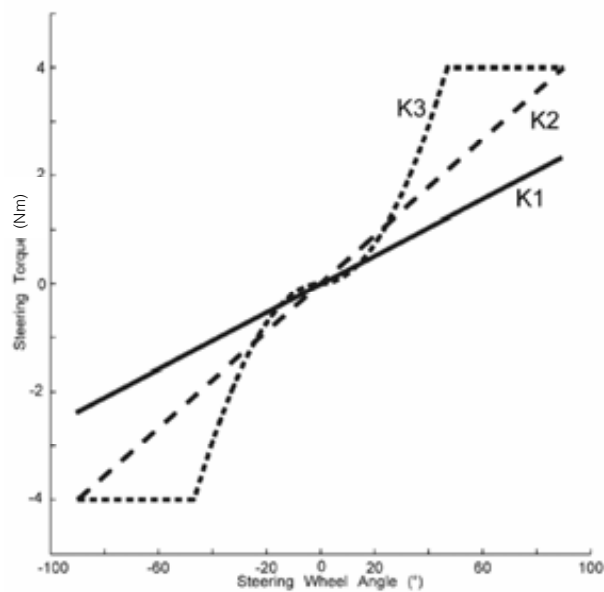
ภาพที่ 2-8 ผลทดสอบการขับขี่โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยกับองศาการเลี้ยวเป็นลักษณะเชิงเส้น[14]

ในทำนองเดียวกัน งานวิจัยของ Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A. และ Droulez, J.[8] ทดสอบการขับขี่โดยใช้เครื่องจำลองการขับขี่ ดังแสดงในภาพที่ 2-9 ซึ่งมีมอเตอร์สร้างแรงบิดที่พวงมาลัยสูงสุดได้ 8 นิวตัน-เมตร ควบคุมการสร้างแรงบิดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าแรงบิดและองศาการเลี้ยว บนเครื่องจำลองการขับขี่โดยทดสอบการขับขี่เป็นเส้นทางโค้งเมื่อมีแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยที่มีขนาดอัตราการขยายต่างๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 จากผลการวิจัยพบว่า การใช้อัตราการขยายขนาดต่างๆ มีผลต่อการควบคุมการขับขี่ของผู้ขับขี่ในระดับหนึ่ง โดยเมื่อแรงบิดมีขนาดเพิ่มขึ้นผู้ขับขี่มีแนวโน้มที่จะควบคุมเสถียรภาพในการขับขี่ได้ดีขึ้น แต่หากไม่มีแรงบิดด้านการหมุนที่

พวงมาลัย จะทำให้การขับที่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากผู้ขับไม่ทราบถึงสภาพการขับที่ขณะนั้นๆ แม้ว่าจะสามารถสังเกตจากสภาพแวดล้อมทางจอแสดงผลก็ตาม



ภาพที่ 2-9 การทดสอบโดยใช้เครื่องจำลองการขับซีรอนด์[8]



ภาพที่ 2-10 ลักษณะแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยที่มีขนาดอัตราขยายต่างกัน[8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าแบบจำลองแรงบิดที่พวงมาลัยซึ่งอยู่ในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมเลี้ยว มีรูปแบบหลักอยู่ 3 แบบ คือ ความสัมพันธ์เชิงเส้น

ลักษณะเป็นตัว S และลักษณะของวงฮีสเทอรีซิส (Dahl model) โดยพบว่าการสร้างแรงบิดลักษณะฮีสเทอรีซิสนั้นมีลักษณะความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้หลายรูปแบบ ทั้งแบบจำลอง Dahl ดังสมการที่ (2-3), การประมาณเชิงเส้นของแบบจำลอง Dahl ดังสมการที่ (2-4) และ (2-5), และแบบจำลองที่ได้จากสมการพิเศษ (2-6) - (2-8) อย่างไรก็ตามการปรับปรุงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆของแรงบิดนี้มีความซับซ้อน จึงเลือกใช้การประมาณแบบจำลอง Dahl เชิงเส้น (2-4) และ (2-5) ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์เข้าใจง่ายที่สุด อีกทั้งยังให้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมเลี้ยวใกล้เคียงกับสมการพิเศษ ซึ่งจะทำให้งานวิจัยสะดวกในการปรับปรุงรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงบิดและองศาการเลี้ยว ส่งผลให้เกิดความเข้าใจในการประเมินหาแบบการสร้างแรงบิดที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้การสร้างแรงบิดโดยใช้แบบจำลอง Dahl ที่ประมาณอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นกับองศาการเลี้ยวตามงานวิจัยของ Saelem, S., Chantranuwathana, S., Panichanun, K., Prempreeda, P., Wichienprakarn, P. และ Kruo-ongarjnkool, P.[12] โดยเปลี่ยนตัวแปรในสมการดังกล่าวให้สอดคล้องกับการสร้างแรงบิด ที่มีความสัมพันธ์กับองศาการเลี้ยวของยานยนต์

2.3 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware และ HIL-Human

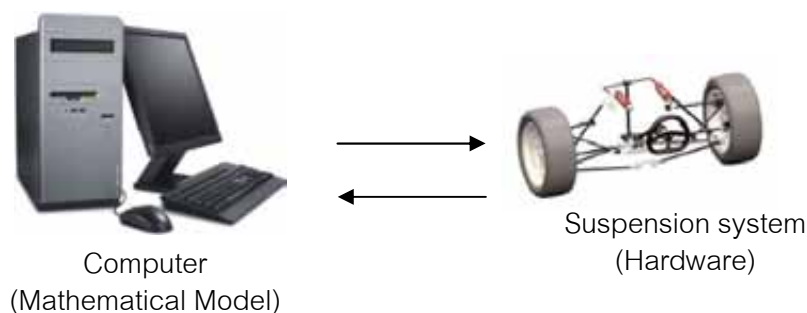
การทดสอบระบบต่างๆก่อนทำการผลิตรถยนต์ออกมาใช้งานจริงจึงเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะต้องกระทำทุกครั้งก่อนการผลิต เพื่อศึกษาการทำงานและการตอบสนองของอุปกรณ์หรือระบบใดๆ ว่ามีลักษณะตามต้องการหรือมีข้อผิดพลาดหรือไม่ โดยเฉพาะการทดสอบทางด้านยานยนต์ เพราะยานยนต์เป็นเครื่องมือที่มนุษย์ใช้ในการคมนาคม ยานยนต์จะต้องตอบสนองต่อความต้องการของผู้ขับขี่อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ขับขี่ขณะใช้งาน ดังนั้นแนวทางการทดสอบยานยนต์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณา

แนวทางการทดสอบทางด้านยานยนต์ซึ่งเป็นที่นิยมนั้น มี 2 รูปแบบหลัก นั่นคือ วิธี HIL-Hardware และ HIL-Human โดยแนวคิดหลักของการทดสอบทั้งสอง เป็นการใช้ระบบจริงแทนที่การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่เสมือนจริงมากที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละแนวทางการทดสอบ ดังนี้

2.3.1 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Hardware

แนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware เป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในปัจจุบันและถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาในงานหลายด้าน เช่น การควบคุมเสถียรภาพรถ (yaw stability control)[15], การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสดังกล่าวเป็นต้นกำลัง[16] เป็นต้น แนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware นั้น มีการทำงานแบบลักษณะเวลาจริง (real-time testing) โดยใช้อุปกรณ์จริง (hardware) ทำงานร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จำลองระบบที่เกี่ยวข้องบางส่วน[17] โดยแผนภาพการทดสอบด้วยวิธีการแบบ HIL-Hardware สามารถแสดงได้ ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 แผนภาพการทดสอบด้วยวิธีการแบบ HIL-Hardware[17]

นั่นคือสามารถนำชิ้นส่วนหรือระบบที่สนใจมาทำการทดสอบ ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ที่มาทดแทนในส่วนของระบบหรืออุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องซึ่งการทดสอบลักษณะดังกล่าว มีข้อดี และข้อเสียหลายประการดังนี้

ข้อดีของการใช้แนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware คือ

1. สำหรับการทดสอบบางอย่าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ จะต้องใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อน ทำให้จำเป็นต้องใช้ตัวแปรจำนวนมากในการทำแบบจำลอง การพัฒนาในส่วนของโปรแกรมจึงมีความยากลำบากและใช้เวลาในการคำนวณมาก ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องและความแม่นยำน้อยลง ดังนั้นการใช้ชิ้นส่วนจริงของระบบมาทำการทดสอบ จะทำให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องและความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งลดระยะเวลาในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงได้
2. ในการทดสอบแบบเก่าบางกรณี เช่น การทดสอบระบบเพียงระบบเดียว อาจจำเป็นต้องสร้างผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้นขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบ เช่น การสร้างรถยนต์ทั้งคันเพื่อการทดสอบระบบเบรกในรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาเป็นอย่างมาก แต่การทดสอบแบบ HIL-Hardware นั้นจะสามารถนำเฉพาะระบบที่สนใจมาทำการทดสอบได้ ทำให้สามารถทำการทดสอบได้สะดวกขึ้น และประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ทำการทดสอบอีกด้วย
3. เนื่องจากการทดสอบ บางครั้งต้องทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมเดิมซ้ำกันหลายครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ การทดสอบแบบเก่าอาจมีผลกระทบที่เกิดขึ้น

จากระบบอื่น ๆ ขึ้นได้ ดังนั้น การทดสอบแบบ HIL-Hardware ที่นำเฉพาะระบบที่สนใจมาทดสอบ จะสามารถลดหรือขจัดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบอื่นที่ไม่สนใจลงได้ ส่งผลให้การควบคุมตัวแปรต่างๆ ทำได้ดีขึ้น และทดสอบซ้ำได้ง่ายขึ้นและปลอดภัยขึ้น สำหรับระบบที่ต้องทดสอบในสถานการณ์อันตราย

ข้อเสียของการใช้แนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware คือ

หากพิจารณาการวิจัยโดยใช้การคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวแล้ว จะพบว่าการทดสอบแบบ HIL-Hardware มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า เนื่องจากจำเป็นต้องใช้งบประมาณส่วนหนึ่งในการสร้างอุปกรณ์จริงขึ้นมา

2.3.2 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HIL-Human

ยานยนต์ที่ผลิตจะต้องตอบสนองต่อความต้องการของผู้ขับขี่อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดความปลอดภัยขณะขับขี่ ดังนั้นการทดสอบระบบบางระบบ จำเป็นจะต้องมีมนุษย์หรือผู้ขับขี่เป็นส่วนหนึ่งในการทดสอบด้วย เพื่อทดสอบถึงการตอบสนองและการตัดสินใจของผู้ขับขี่ ซึ่งไม่สามารถแทนที่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากมนุษย์แต่ละคนมีความแตกต่างกันในทุกด้าน ดังนั้นการทดสอบระบบที่มีมนุษย์เป็นผู้ควบคุมโดยตรง เช่น ความรู้สึกขับขี่ที่ง่าย หรือความรู้สึกปลอดภัย[18] จึงนิยมใช้แนวทางการทดสอบแบบ Human-HIL โดยอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่นิยมใช้ในการทดสอบดังกล่าวทางด้านยานยนต์ คือ เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ (Driving Simulator: DS) ดังแสดงในรูป 2-12



ภาพที่ 2-12 เครื่องจำลองการขับขี่ใน 3 ระดับขั้นเสรี โดยใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเป็นอุปกรณ์ขับ[19]

เครื่องจำลองการขับขี่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ณ สถานการณ์ใดๆ โดยทำให้ผู้ขับขี่ รับรู้ถึงสภาพการณ์ทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ และ สถานการณ์การขับขี่จากสภาพสิ่งแวดล้อมที่จำลองขึ้น การจำลองดังกล่าวควบคุมโดยโดยการ คำนวณค่าสัญญาณควบคุมจากผู้ขับขี่ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นั่นคือ สามารถแบ่งการ ทำงานของเครื่องจำลองการขับขี่ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่จำลองลักษณะการเคลื่อนที่ และส่วน ที่จำลองสภาพการขับขี่ การศึกษาทางด้านยานยนต์นั้น นิยมใช้เครื่องจำลองการขับขี่เพื่อเพิ่ม ประสบการณ์การขับขี่ หรือใช้ทดสอบการขับขี่ในสถานการณ์ที่อาจเกิดอันตรายขึ้นจากการ เปลี่ยนแปลงส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ ในด้านงานวิจัย เครื่องจำลองการขับขี่ถูกนำมาใช้เพื่อ ศึกษาด้านความรู้สึกของผู้ขับขี่ แต่เนื่องจากเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์นั้นมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ในงานวิจัยบางชิ้นมีการใช้เครื่องจำลองการขับขี่ที่มีจำนวนองศาอิสระน้อยกว่า 6 แกน เพื่อลด ค่าใช้จ่ายในการทดสอบการเคลื่อนที่ในบางแกนเท่านั้น เช่น ลดจำนวนระดับขั้นเสรีและกลไกการ เคลื่อนที่[18][20] เพื่อการทดสอบระบบช่วงล่าง การทดสอบความสบายขณะขับขี่เป็นต้น

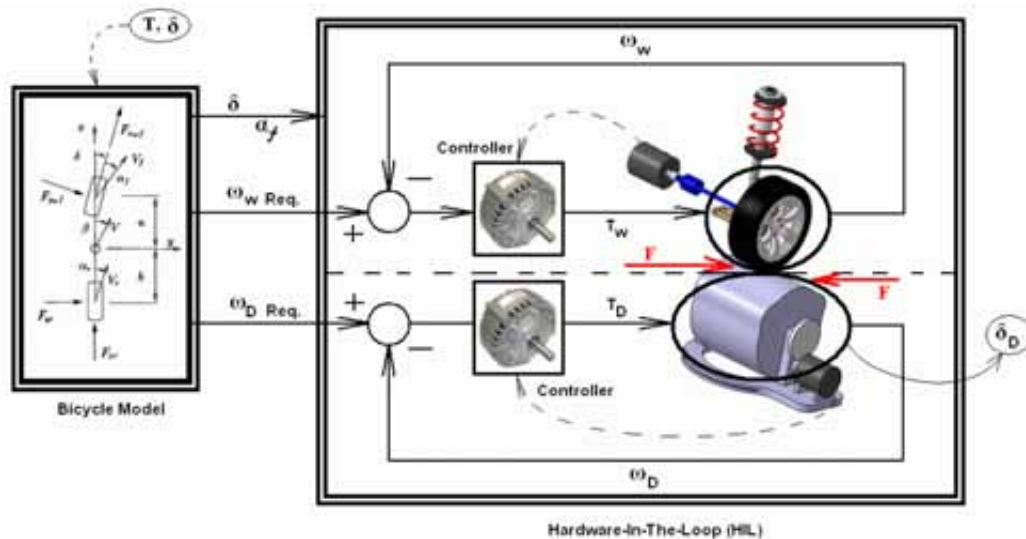
2.4 แนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HHIL

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเสนอแนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี Human-Hardware-In-The-Loop (HHIL) โดยการพัฒนางานวิจัย “ระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับระบบล้อ ระบบรองรับ และระบบบังคับเลี้ยวจริง (TIRE-SUSPENSION-STEERING HARDWARE-IN-THE-LOOP FOR VEHICLE DYNAMICS SIMULATION)”[17] และ “งานวิจัยการออกแบบและ สร้างเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์แบบ 2 ระดับขั้นเสรี (The Designing and Manufacturing of a 2-DOF Automobile Driving Simulator)”[18] ให้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยใช้ระบบบังคับ เลี้ยวด้วยไฟฟ้าที่อยู่ในระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แทนส่วนอุปกรณ์ หรือส่วนของ hardware และใช้เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ในการติดต่อสื่อสารกับผู้ขับขี่ หรือส่วนของ human

2.4.1 เครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เต็ม (ชุดทดสอบ HIL-Hardware)

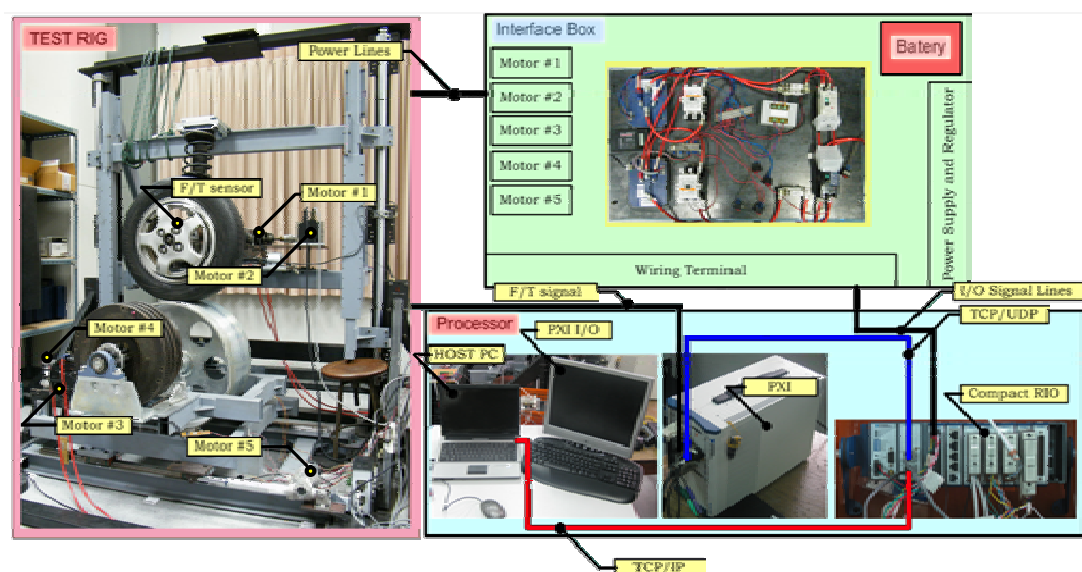
เครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เต็มถูกพัฒนาและสร้างขึ้นเพื่อเสนอวิธีการตรวจวัดแรงที่ เกิดขึ้นกับล้อทดสอบ โดยใช้ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลแบบ ขับเคลื่อนล้อหน้า ที่ทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ใช้หลักการการเปลี่ยนการ เคลื่อนที่เชิงเส้นของล้อทดสอบบนพื้นถนนมาเป็นการกลิ้งบนล้อจำลองพื้นถนนที่สามารถควบคุม อัตราเร็วเชิงมุมและมุมการวางตัวได้ และสามารถควบคุมการเกิดมุมลื่นไถลได้โดยการควบคุมมุม เลี้ยวของล้อทดสอบ แรงที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) และส่งสัญญาณ

ป้อนกลับเข้าสู่แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบจักรยาน (Single track model/Bicycle model) เพื่อทำการคำนวณค่าสถานะต่างๆของรถยนต์ในแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 แผนผังการทำงานของเครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์[17]

เครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์นี้ ถูกควบคุมการทำงานด้วยอุปกรณ์ประมวลผล 3 ชุด ได้แก่ คอมพิวเตอร์ notebook ที่ใช้ในการสื่อสารกับผู้ใช้งาน, NI PXI Controller สำหรับการตรวจวัดแรงรวมไปถึงการเก็บข้อมูลการทดสอบ และ NI CompactRIO ที่ใช้ในการประมวลผลคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่างๆในชุดทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-14 ในส่วนของโปรแกรมทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมนั้น ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม NI LabVIEW[®]



ภาพที่ 2-14 ระบบควบคุมหลักของชุดทดสอบ HIL-Hardware[17]

ขอบเขตและข้อกำหนดในการทำงานของเครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เต็ม แสดงดัง ตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ขอบเขตในการทำงานของเครื่องจำลองพลศาสตร์ยานยนต์

การทำงาน	ขอบเขตการทำงาน	หมายเหตุ
ระยะการเคลื่อนที่ของล้อจำลองพื้นถนนในแนวราบ	-/+ 93 มิลลิเมตร	
สามารถสร้างมุมเลี้ยวให้กับล้อทดสอบและมุมการวางตัวของล้อจำลองพื้นถนน	-5 องศาถึง 8 องศา	
มุมลื่นไถลสูงสุด	-/+ 3 องศา	เนื่องมาจากข้อกำหนดในการสร้างแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบ
อัตราเร็วสูงสุดของล้อทดสอบ เมื่อมุมลื่นไถลเป็น 0 องศา	3.7 รอบต่อวินาที (24.2 กิโลเมตร/ชั่วโมง)	
มีอัตราเร็วสูงสุด เมื่อมุมลื่นไถลมีค่าสูงสุด (+/- 3 องศา)	2.6 รอบต่อวินาที (17.1 กิโลเมตร/ชั่วโมง)	

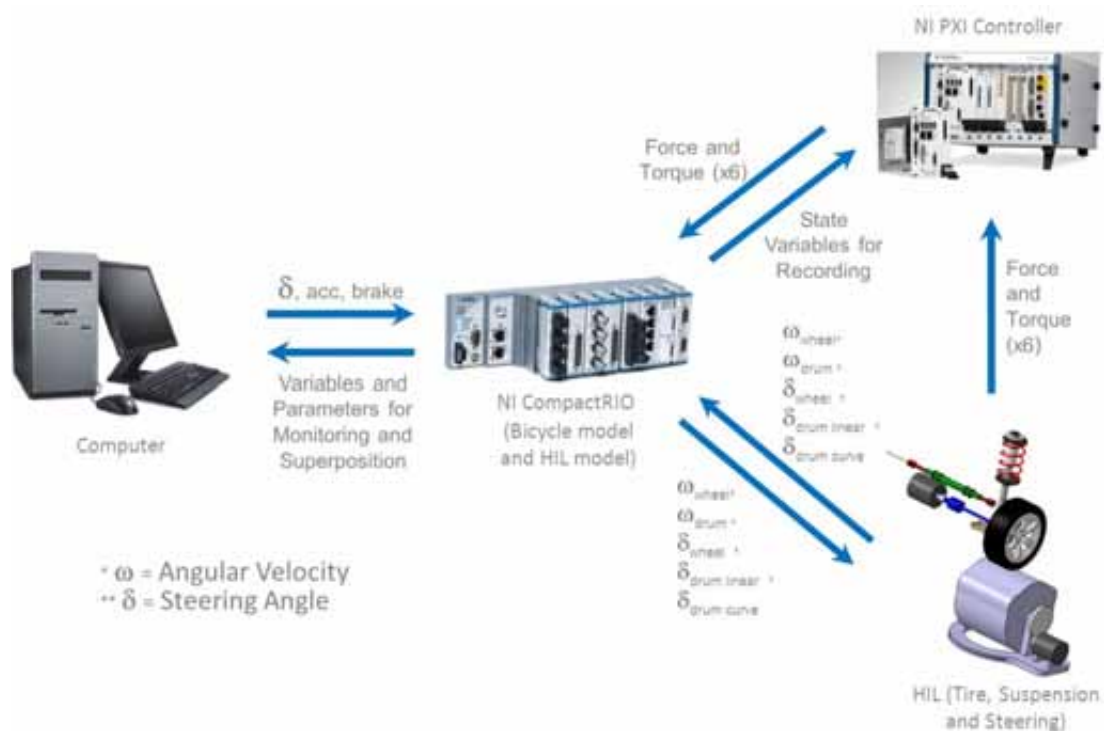
* สุรเชษฐ์ สุขไชยพร [17]

การสื่อสารภายในระบบนั้น จะมีการรับ-ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของแต่ละโมดูลที่ติดตั้งอยู่บน NI CompactRIO โดยในที่นี้ โมดูลที่มีการใช้งาน คือ

- 16-Channel, ± 10 V, 16-Bit Analog Voltage Output Module
- 6-Channel Differential Digital Input Module (3 modules)
- 32-Channel, ± 200 mV to ± 10 V, 16-Bit Analog Input Module

จากภาพที่ 2-15 เมื่อชุดทดสอบ HIL-Hardware ทำงาน จะต้องทำการป้อนค่ามุมเลี้ยวแรงขับจากการเร่ง และแรงต้านจากการเบรก ผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งผ่านทางสายสื่อสารประเภท TCP/IP ค่าจะถูกนำไปใช้ประมวลผลบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะได้สัญญาณการควบคุมมอเตอร์ทั้งตำแหน่งและความเร็วที่ติดตั้งอยู่ที่ล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน ผ่าน

ทางช่องสัญญาณ Analog Output เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานตามค่าที่ป้อนข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ การควบคุมดังกล่าวมีการตรวจวัดการทำงานโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดประเภทเอนโคดเดอร์ (encoder) ส่งสัญญาณกลับไปให้ NI CompactRIO ผ่านทางช่องสัญญาณ Digital Input และ Analog Input เมื่อชิ้นส่วนจริงทำงานจะเกิดแรงกระทำที่ล้อ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท strain gage ที่ติดตั้งไว้ที่ล้อ ค่าแรงจะส่งสัญญาณผ่าน NI PXI Controller เพื่อทำหน้าที่แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าแรงที่เกิดขึ้นก่อนส่งสัญญาณกลับไปให้ NI CompactRIO ผ่านทางสายสื่อสารประเภท TCP/UDP นอกจากนี้ สายสื่อสารดังกล่าวยังเป็นช่องทางส่งค่าที่ต้องการบันทึกกลับไปให้ NI PXI Controller ด้วย เมื่อต้องการแสดงผลการทดลอง ในสถานการณ์ใดๆ ค่าที่สนใจจะถูกส่งผ่านสายสื่อสาร TCP/IP เพื่อแสดงผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์

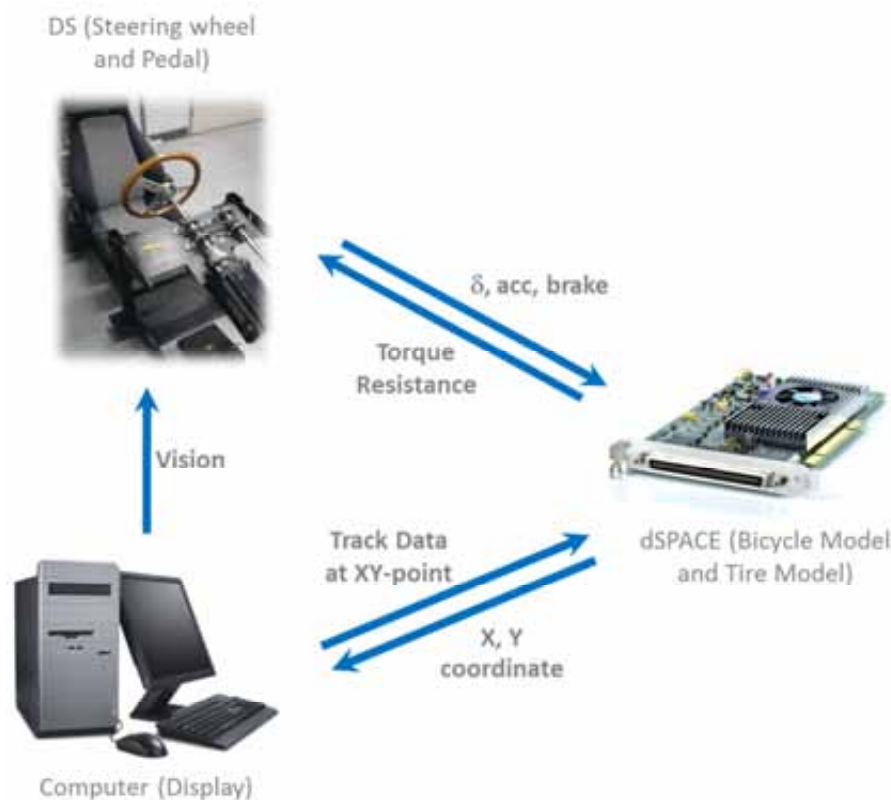


ภาพที่ 2-15 แผนผังรับ-ส่งข้อมูลภายในระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์

2.4.2 เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์เดมิม (Driving Simulator; DS)[18][20]

เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ถูกสร้างมาให้การตอบสนองของผู้ขับขี่ด้านมุมเลี้ยว การเร่ง และการเบรก โดยสัญญาณการตอบสนองดังกล่าวในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า จะถูกนำไปใช้ประมวลผลบนแบบจำลองจักรยาน กำหนดให้เป็นรถยนต์ขับเคลื่อนล้อหลัง

ควบคุมการทำงานด้วยอุปกรณ์ประมวลผล DS1104 card และพัฒนางานในส่วนของโปรแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB®Simulink จากนั้นอุปกรณ์ประมวลผลจะส่งสัญญาณออกมาควบคุมการสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยโดยใช้มอเตอร์ และส่งข้อมูลพิกัดตำแหน่งไปที่โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่จำลองเส้นทางหรือสภาพการขับขี่ แต่ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อแสดงสภาพการณ์ทางพลศาสตร์ให้ผู้ขับขี่รับรู้ได้ โดยการสื่อสารภายในระบบนั้นจะมีการรับ-ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของ dSPACE ดังแสดงในภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 แผนผังการทำงานของระบบจำลองการขับขี่รถยนต์เดิม

จากภาพที่ 2-16 เมื่อผู้ขับขี่ใช้เครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ การหมุนพวงมาลัย การเหยียบคันเร่งและเบรก จะทำให้เกิดสัญญาณส่งเข้าสู่ dSPACE โดยค่าของมุมเลี้ยวใช้แอนโคเดเตอร์ตรวจวัด และส่งค่าเข้าช่องสัญญาณ Inc แต่ค่าความเร่งและเบรกจะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) สัญญาณดังกล่าวผ่านเครื่อง dSPACE ทางช่องสัญญาณ A/D เพื่อทำการแปลงสัญญาณและนำไปประมวลผลแบบเวลาจริง (real-time processing) จากนั้น จะส่งสัญญาณการสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยผ่านช่องสัญญาณ D/A ในขณะที่พิกัดตำแหน่งที่ส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเส้นทางขับขี่นั้นจะส่งผ่านช่องสัญญาณประเภท PCI Bus

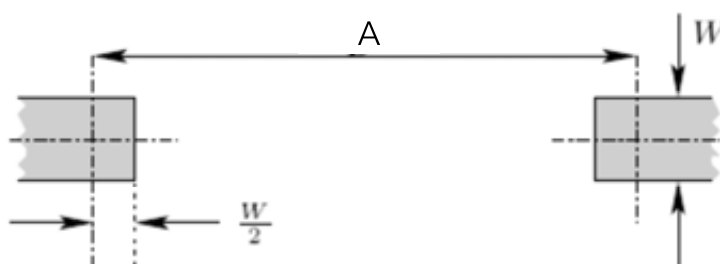
2.5 การประเมินความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่[21]

ในการประเมินความยากง่ายของงานนั้น พิจารณาจากประสิทธิภาพในการขับขี่ที่สภาวะการขับขี่ที่แตกต่างกัน นั่นคือ อัตราการเบี่ยงเบนของรถ เทียบกับแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัยขนาดต่างๆ ในขณะเดียวกัน ความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่ พิจารณาจากการลดลงของประสิทธิภาพในการขับขี่เมื่อเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่ง โดยแนวความคิดการประเมินประสิทธิภาพของการขับขี่ยานยนต์ ดัดแปลงมาจากการประเมินประสิทธิภาพในการทำงานของมนุษย์ โดยแนวทางการประเมินประสิทธิภาพการทำงานที่ได้รับความนิยมและเป็นวิธีการที่เป็นมาตรฐานมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ กฎของฟิตส์ (Fitts' Law)

2.5.1 กฎของฟิตส์

กฎของฟิตส์นั้นพัฒนามาจากความสัมพันธ์ระหว่างความยากของงานและเวลาที่ใช้ในการทำงาน โดยจำลองรูปแบบพฤติกรรมกรรมการตอบสนองของร่างกายมนุษย์ (Human Psychomotor Behaviour) ซึ่งได้จากการพิจารณาและสร้างขึ้นโดยอาศัยทฤษฎีข่าวสารของแซนนอน[22] ดังมีรายละเอียดแสดงที่ภาคผนวก ก

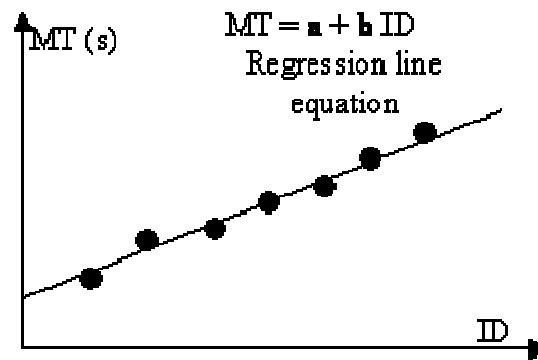
กฎของฟิตส์ถูกใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง และการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 2-17 ซึ่งถือว่าเป็นงานที่เป็นพื้นฐานสำคัญในการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2-18 นิยามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-9)



ภาพที่ 2-17 การทดลองกฎของฟิตส์

โดยกำหนดให้

- A คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่ (Amplitude)
 W คือ ความคาดเคลื่อนที่ยินยอมในการเคลื่อนที่หรือก็คือ ความกว้างของเส้นทางที่เคลื่อนที่ (Width)



ภาพที่ 2-18 เส้นการถดถอยของกฎของฟิตส์

$$MT = a + b(ID) \quad (2-9)$$

โดยกำหนดให้

MT คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Movement time)

a, b คือ ค่าคงที่ถดถอย

ID คือ ค่าดัชนีความยากง่ายของงานที่ทำ (Index of Difficulty)

ค่าดัชนีความยากง่ายของงานที่ทำ มีความสัมพันธ์กับลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ (2-10)

$$ID = \log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \quad (2-10)$$

ดังนั้น รูปแบบความสัมพันธ์ตามกฎของฟิตส์ จะเป็นดังสมการที่ (2-11)

$$MT = a + b \left(\log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \right) \quad (2-11)$$

เมื่อพิจารณาค่า b ซึ่งเป็นค่าคงที่ถดถอยนั้น ยังเป็นส่วนกลับของความชันระหว่างดัชนีความยากง่ายของงานกับเวลาที่ใช้ในการทำงาน ซึ่งสามารถเทียบได้กับดัชนีประสิทธิภาพ (Index of Performance, IP) ดังแสดงในสมการที่ (2-12)

$$IP = \frac{ID}{MT} \quad (2-12)$$

ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า

- ค่า ID คือค่าแสดงความยากง่ายของงานที่ทำ โดยงานที่ทำสำเร็จได้ยาก จะมีค่า ID สูง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2-11) แล้ว พบว่าเมื่อค่าระยะทางที่เคลื่อนที่ (A) เพิ่มขึ้นแล้ว

จะทำให้การทำงานยากขึ้น และเมื่อค่าความกว้างของเส้นทางที่เคลื่อนที่ (W) เพิ่มขึ้นแล้ว จะทำให้การทำงานง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานในความเป็นจริง

- ค่า IP คือค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการทำงานของบุคคล ซึ่งเปรียบได้กับทักษะในการทำงานของบุคคลที่แตกต่างกันไป นั่นคือบุคคลที่มีทักษะในการทำงานหนึ่งสูง จะมีประสิทธิภาพในการทำงานให้สำเร็จสูงเช่นเดียวกัน
- ค่า MT คือค่าเวลาที่ใช้ในการทำงาน ทั้งนี้ เมื่อพิจารณากรณีปริมาณหรือคุณภาพงานที่เท่ากัน งานที่ใช้เวลาในการทำน้อย หมายถึงผู้ที่ทำงานมีทักษะในการทำงานสูง โดยค่าเวลาที่ใช้ในการทำงานดังกล่าว อาจเปรียบได้กับความเสียหายที่เกิดจากการทำงาน ซึ่งหากงานที่ทำยาก ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้น เมื่อผู้ทำงานมีทักษะในการทำงานคงที่เป็นค่าใดๆ

2.5.2 การประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์กับการประเมินความยากง่ายในการซับซ้อน

จากกฎของฟิตส์ ค่าแสดงประสิทธิภาพในการทำงาน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่แสดงถึงทักษะในการทำงานของบุคคล ดังนั้น สำหรับการซับซ้อนยานยนต์ จะต้องมีค่า IP ที่เป็นค่าคงที่ใดๆ แสดงถึงทักษะในการซับซ้อนของแต่ละบุคคลแตกต่างกันไป โดยจากสมการที่ (2-12) พบว่าค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า ID และค่า MT ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่ของการซับซ้อนที่ความเร็วคงที่แล้ว อาจกล่าวได้ว่า ค่าเวลาที่ใช้ในการทำงาน (ซับซ้อน) เป็นค่าคงที่ ดังนั้น MT สำหรับการซับซ้อนที่ความเร็วคงที่ จะหมายถึงค่าความเสียหายเกิดขึ้น นั่นคือค่าที่แสดงถึงการเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางที่ซับซ้อน สำหรับค่า ID ที่แสดงความยากง่ายของงานนั้น ในกรณีนี้คือความรู้สึกจากการซับซ้อน (ซับซ้อน หรือซับซ้อนง่าย) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าขนาดของแรงบิดมีผลต่อความยากง่ายในการรักษาเสถียรภาพขณะซับซ้อน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดจากการซับซ้อนและความยากง่ายในการซับซ้อน มีความสัมพันธ์ในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับกฎของฟิตส์ ดังนี้

- ค่า ID

ค่าแสดงความยากง่ายของงานที่ทำ --> ความยากง่ายในการรักษาเสถียรภาพขณะซับซ้อน

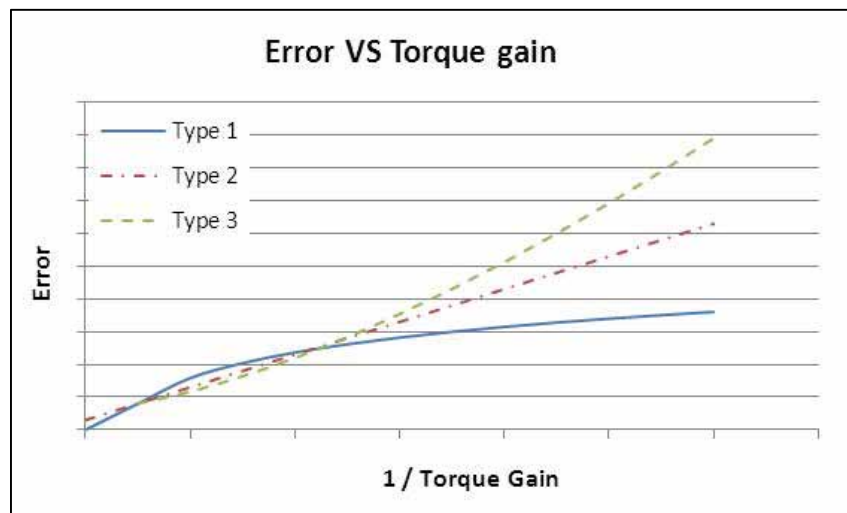
- ค่า IP

ค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการทำงานของบุคคล --> ทักษะในการซับซ้อนของแต่ละบุคคล

- ค่า MT

ค่าเวลาที่ใช้ในการทำงาน --> ค่าที่แสดงถึงการเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางที่ซับซ้อน

อย่างไรก็ตาม จากที่กล่าวข้างต้นว่า ขนาดของแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยมีผลต่อความยากง่ายในรักษาเสถียรภาพขณะขับขึ้นเนิน ยังไม่สามารถบอกได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงบิดกับความยากง่ายในการขับจะอยู่ในรูปแบบใด อนึ่ง การประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ในการวิเคราะห์ความยากง่ายในการขับด้วยระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า เบื้องต้นพิจารณาจากรูปแบบความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2-17 โดยกำหนดให้ความยากง่ายในการขับที่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับขนาดของแรงบิด หรืออัตราขยายแรงบิดด้านการพวงมาลัย ซึ่งจากสมการ (2-9) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะขับและขนาดของแรงบิดย้อนกลับ ซึ่งแปรผันตามค่าอัตราการขยายของการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย (Torque gain) ได้ดังภาพที่ 2-19 และสมการที่ (2-15)



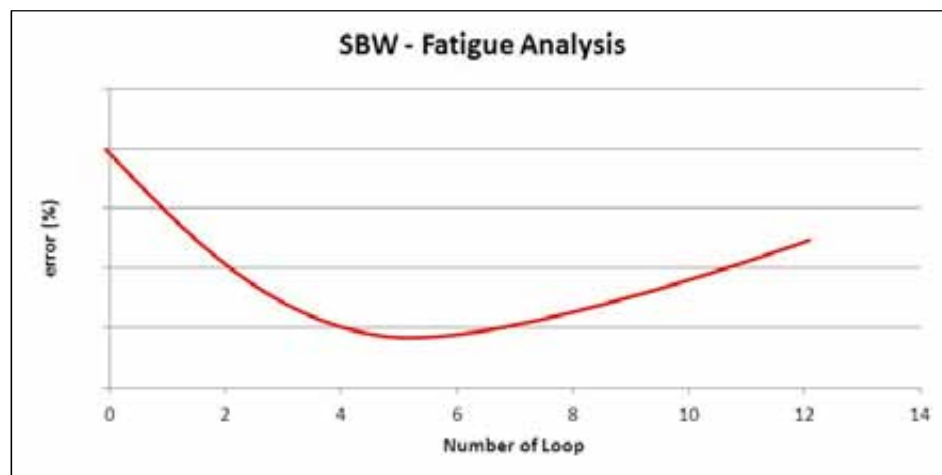
ภาพที่ 2-19 รูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างค่าความผิดพลาดที่และค่าอัตราการขยายการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย

$$error = \begin{cases} a' + b' \left(\frac{1}{\log K_\tau} \right) & ; type 1 \\ a' + b' \left(\frac{1}{K_\tau} \right) & ; type 2 \\ a' + \left(\frac{1}{K_\tau} \right)^{b'} & ; type 3 \end{cases} \quad (2-15)$$

- เมื่อ $error$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะขับ
 K_τ คือ ค่าอัตราการขยายการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย
 a' คือ ค่าคงที่ของความผิดพลาด
 b' คือ ส่วนกลับประสิทธิภาพในการขับ $\left(\frac{1}{IP} \right)$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ค่าอัตราการขยายการสร้างความแรงบิดที่พวงมาลัยมี 2 แบบ คือ ตัวแปรปรับปรุงแบบจำลองแรงบิด Dahl (β) ซึ่งมีค่าที่ต่างกัน จะทำให้แบบจำลองแรงบิดมีรูปร่างต่างกัน และค่าคงที่ใดๆสำหรับแบบจำลองแรงบิดเชิงเส้น จากภาพที่ 2-19 เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและอัตราการขยายการสร้างความแรงบิดไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในรูปแบบใด ดังนั้นค่าคงที่ a' และ b' อาจเป็นค่าความสัมพันธ์ในรูปของลอการิทึม ค่าคงที่ หรือค่าเลขยกกำลังก็ได้

การพิจารณาหาความยากง่ายและความล้าของผู้ขับขี่ พิจารณาจากลักษณะการขับขี่ในสถานการณ์ทั่วไป เนื่องจากผู้ขับขี่โดยปกติ จะต้องเรียนรู้การขับขี่ในยานยนต์ลักษณะต่างๆ ซึ่งการเรียนรู้ดังกล่าว อาจเป็นผลทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะขับขี่มีขนาดลดลงเรื่อยๆ และเริ่มมีค่าคงที่ ที่ค่าใดๆ เมื่อเกิดความเคยชินและเข้าใจในระบบการทำงานของยานยนต์นั้นๆแล้ว จากนั้นผู้ขับขี่อาจเกิดความล้าเมื่อขับขี่เป็นเวลานานขึ้น ซึ่งอาจเป็นต้นเหตุให้ค่าความผิดพลาดในการขับขี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นได้ โดยแนวความคิดวิเคราะห์หาความยากง่ายของการขับขี่ และความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับขี่นั้น อาจสามารถแสดงได้ดังความสัมพันธ์ในภาพที่ 2-20



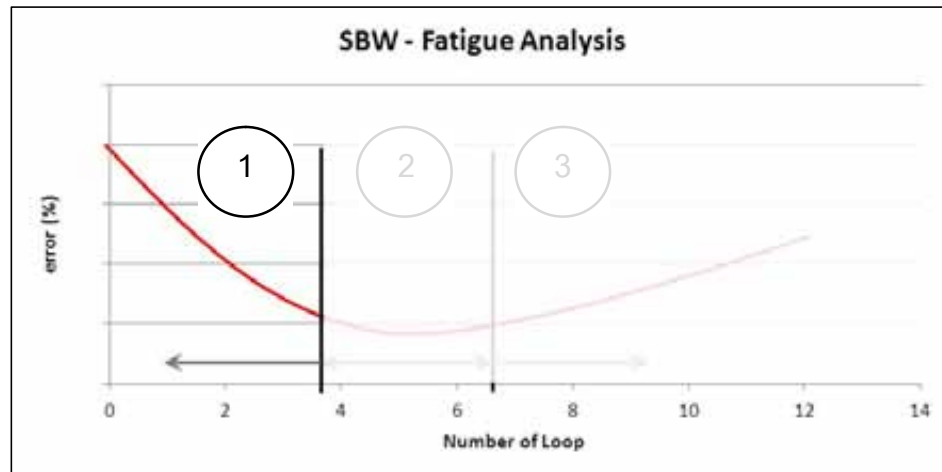
ภาพที่ 2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดที่และค่าอัตราการขยายการสร้างความแรงบิดที่พวงมาลัย

ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการพิจารณาได้ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ส่วนที่ 1: ส่วนพิจารณาการเรียนรู้ของผู้ขับขี่

จากภาพที่ 2-21 ในการขับขี่ช่วงแรก ผู้ขับขี่จำเป็นต้องเรียนรู้ลักษณะของระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้อยู่ ทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจสูงผิดปกติ ในช่วงนี้ค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลดลงเนื่องจากผู้ขับขี่มีประสบการณ์ในการขับขี่ด้วยระบบใดๆมาก

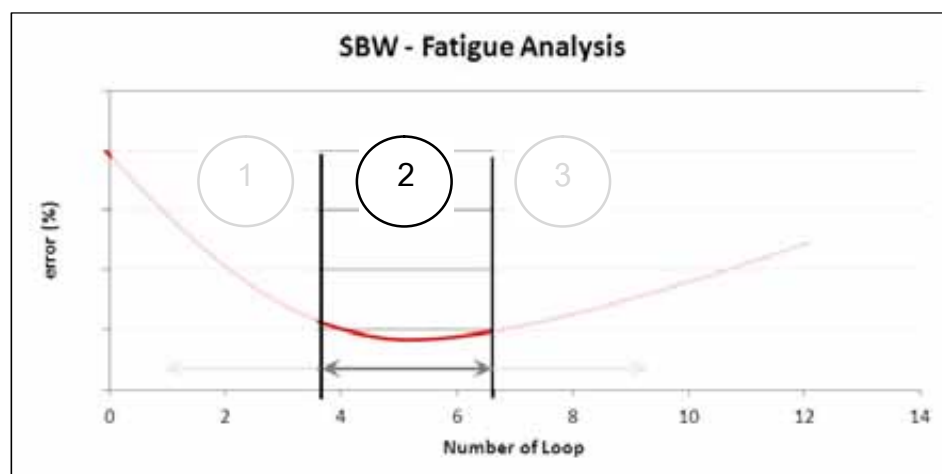
ยิ่งขึ้น โดยแนวโน้มการลดลงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการเรียนรู้ของผู้ขับขี่แต่ละคน



ภาพที่ 2-21 แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับขี่ช่วงแรก

- ส่วนที่ 2: ส่วนพิจารณาความยากง่ายในการขับขี่

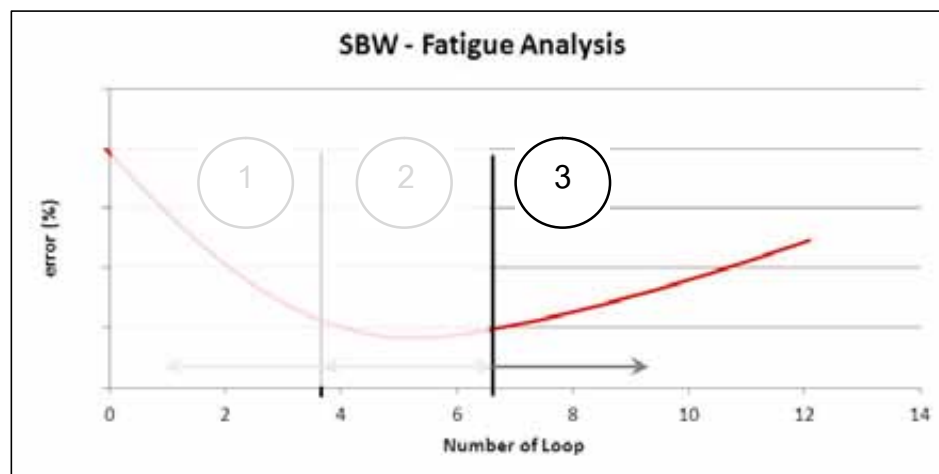
จากภาพที่ 2-22 ในการขับขี่ช่วงต่อมา เมื่อผู้ขับขี่เรียนรู้การขับขี่ด้วยระบบใดๆ แล้ว จะสามารถคงการขับขี่ไว้ที่ความผิดพลาดค่าหนึ่งได้ โดยค่าความผิดพลาดนั้นจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความสามารถในการขับขี่ของผู้ขับขี่และความยากง่ายของงานที่ทำ ในงานวิจัยนี้ พิจารณาถึงความยากง่ายในการขับขี่เมื่อขนาดของอัตราการขยายในการสร้างแรงบิดแตกต่างกัน



ภาพที่ 2-22 แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับขี่ช่วงที่สอง

- ส่วนที่ 3: ส่วนพิจารณาความล้าของผู้ขับขี่

จากภาพที่ 2-23 ในการขับเคลื่อนช่วงสุดท้าย เมื่อผู้ขับขี่ขับเป็นเวลานาน จะเกิดความล้า ซึ่งความล้าดังกล่าวอาจเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดเพิ่มขึ้นในเวลาต่อมา



ภาพที่ 2-23 แนวโน้มค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการขับเคลื่อนช่วงท้าย

ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงนำแนวคิดข้างต้นมาใช้ในการวิเคราะห์ความยากง่ายและความล้าที่เกิดขึ้นในการขับขี่ด้วยระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าที่ขนาดอัตราการขยายของแรงบิดที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม แนวคิดดังกล่าวเป็นเพียงข้อสันนิษฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการพิจารณาความล้าเท่านั้น ไม่อาจสรุปได้โดยแน่ชัดว่าความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและจำนวนรอบการขับขี่ในแต่ละช่วงมีแนวโน้มเป็นอย่างไร

2.6 บทสรุปจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าที่ดี จะต้องสามารถสร้างความรู้สึกของสภาพถนนให้แก่ผู้ขับขี่ได้ โดยยานยนต์ที่ขับซึ่งง่าย จะทำให้ผู้ขับขี่สามารถรักษาเสถียรภาพขณะขับรถไว้ได้ โดยที่อาจเกิดความล้าน้อย หรือไม่เกิดความล้าขณะขับก็ได้อีกด้วย จะพบว่าประเด็นสำคัญในการทดสอบมุ่งเน้นไปที่การรับรู้ของผู้ขับขี่ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แนวทางการทดสอบแบบ HHIL ในการทดสอบเบื้องต้น โดยการประเมินผลทางด้านความยากง่ายและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ เมื่อแรงบิดที่พวงมาลัย สร้างจากแบบจำลองแรงบิด Dahl ที่ประมาณในความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันตามค่าของตัวแปรปรับรูปร่าง β และแบบจำลองแรงบิดเชิงเส้นที่มีอัตราขยายแรงบิดขนาดต่างกัน โดยจะประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ และแนวคิดด้านความยากง่ายและความล้าจากการขับขี่เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์

บทที่ 3

การพัฒนาชุดทดสอบ HHIL

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาและพัฒนาแนวทางการทดสอบยานยนต์ด้วยวิธี HHIL โดยการประยุกต์นำแนวทางการทดสอบแบบ HIL-Hardware และ HIL-Human มาเชื่อมต่อกัน ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของยานยนต์ และระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบ และทดสอบ เพื่อเลือกใช้ระบบสื่อสารที่เหมาะสม

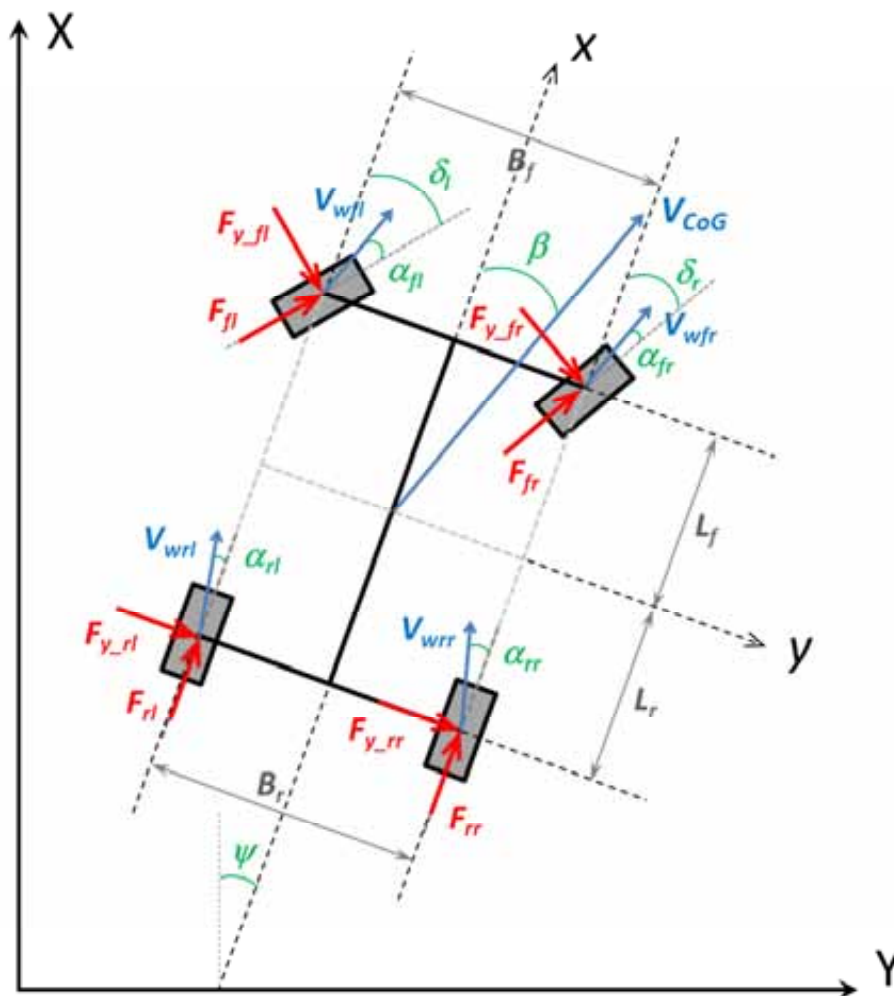
ชุดทดสอบ HHIL พัฒนาจากชุดทดสอบพลศาสตร์ยานยนต์แบบ HIL-Hardware เดิมที่สร้างเพื่อศึกษาการวัดแรงที่ล้อ[17] และงานวิจัยเครื่องจำลองการขับที่รถยนต์[18][20] มีประเด็นสำคัญอยู่ที่การนำชุดทดสอบ HIL-Hardware และเครื่องจำลองการขับให้ทำงานร่วมกัน โดยใช้อุปกรณ์ประมวลผลและแบบจำลองยานยนต์ร่วมกัน มุ่งเน้นไปที่การทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะนำมาประเมินความยากง่ายและความล่าช้าที่เกิดขึ้นจากการขับ เมื่อมีการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยขนาดต่างๆกัน จากความต้องการดังกล่าวจึงสามารถกำหนดข้อจำกัดในการทำงานของชุดทดสอบ HHIL ได้ดังนี้

1. รับสัญญาณการขับที่ นั่นคือ ค่ามุมเลี้ยว การเร่ง และการเบรกของผู้ขับที่ผ่านทางเครื่องจำลองการขับที่รถยนต์
2. ใช้ค่าแรงที่ตรวจวัดได้ที่ล้อ เป็นสัญญาณเข้าเพื่อคำนวณการสร้างแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัย
3. เลือกใช้แบบจำลองยานยนต์ แทนแบบจำลองอย่างง่าย หรือแบบจำลองจักรยาน ในการจำลองพลศาสตร์ทางยานยนต์

3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของยานยนต์[23]

จากความต้องการข้างต้น เนื่องจากการทดสอบระบบ SBW ดังกล่าวจะทำการทดสอบการขับที่เป็นเส้นตรงและทางโค้ง ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองยานยนต์ที่มีการกระจายของน้ำหนักเท่ากันทุกล้อ อีกทั้งกำหนดให้ไม่มีการโคลงของตัวรถเกิดขึ้น (pitch and roll) โดยกำหนดแกนการเคลื่อนที่ของตัวรถ ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ใช้ระบบแกนอ้างอิง 2 ระบบ คือ แกนอ้างอิงหลักที่อยู่กับที่เทียบกับโลก (แกน X, Y) เป็นแกนที่ใช้ในการบอกพิกัดสัมบูรณ์ของรถ และแกนอ้างอิงที่ติดไปกับตัวรถ (แกน x -ตามแนวยาวของตัวรถ, y -ตั้งฉากกับตัวรถ) โดยระบบแกนนี้จะมีทิศทาง

เปลี่ยนไปตลอดเวลาตามการเคลื่อนที่ของรถ มีไว้เพื่อช่วยในการอ้างอิงถึงแรงต่างๆที่กระทำต่อตัวรถเมื่อรถเคลื่อนที่ไป มุมที่ตัวรถกระทำกับแนวแกนอ้างอิงหลักคือ ψ (yaw angle) แรงกระทำต่อรถเมื่อมองจากทางด้านบน ประกอบด้วยแรงตามแนวการวางตัวของล้อรถ ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อตัวรถ และเมื่อมีการเลี้ยวจะมีแรงตั้งฉากกับแนวการวางตัวของล้อกระทำกับยางล้อ โดยแรงที่เกิดขึ้นที่ล้อกำหนดให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นสัมพันธ์กับมุมลื่นไถลที่ล้อนั้น



ภาพที่ 3-1 แบบจำลองยานยนต์

กำหนดให้ตัวแปรต่างๆในภาพที่ 3-1 มีความหมายดังต่อไปนี้

- L_f ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางมวลของรถยนต์กับตำแหน่งของล้อหน้า คือ
- L_r คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางมวลของรถยนต์กับตำแหน่งของล้อหลัง
- B_f คือระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของล้อหน้า
- B_r คือระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของล้อหลัง

* กำหนดให้ B_f และ B_r มีค่าเท่ากัน

δ_{fl}	คือ มุมเลี้ยวของล้อหน้าซ้าย
δ_{fr}	คือ มุมเลี้ยวของล้อหน้าขวา
β	คือ มุมลื่นไถลที่ศูนย์กลางมวลของรถยนต์
α_{fl}	คือ มุมลื่นไถลด้านข้างที่ล้อหน้าซ้าย
α_{fr}	คือ มุมลื่นไถลด้านข้างที่ล้อหน้าขวา
α_{rl}	คือ มุมลื่นไถลด้านข้างที่ล้อหลังซ้าย
α_{rr}	คือ มุมลื่นไถลด้านข้างที่ล้อหลังขวา
ψ	คือ มุมที่ตัวรถกระทำกับแนวแกนอ้างอิงหลัก หรือ มุม yaw
$\dot{\psi}$	คือ อัตราเร็วเชิงมุมของตัวรถ หรือ yaw rate
F_{fl}	คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาว (longitudinal force) ของล้อหน้าซ้าย
F_{fr}	คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหน้าขวา
F_{rl}	คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหลังซ้าย
F_{rr}	คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหลังขวา
F_{y_fl}	คือ แรงที่กระทำด้านข้าง(lateral force) ของล้อหน้าซ้าย
F_{y_fr}	คือ แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหน้าขวา
F_{y_rl}	คือ แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหลังซ้าย
F_{y_rr}	คือ แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหลังขวา
V_{wfl}	คือ ทิศทางความเร็วของล้อหน้าซ้าย
V_{wfr}	คือ ทิศทางความเร็วของล้อหน้าขวา
V_{wrl}	คือ ทิศทางความเร็วของล้อหลังซ้าย
V_{wrr}	คือ ทิศทางความเร็วของล้อหลังขวา
V_{CoG}	คือ ความเร็วของศูนย์กลางมวลรถยนต์ สามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้

อัตราเร็วรถตามแกน x คือ $V_{CoG} \cos(\beta) = v_x$

อัตราเร็วรถตามแกน y คือ $V_{CoG} \sin(\beta) = v_y$

พิจารณาภาพที่ 3-1 เพื่อเขียนสมการการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้รถมีมวล m และโมเมนต์ความเฉื่อยรอบศูนย์กลางมวลคือ I_z

คิดผลของแรงตามแกน x (แนวตามยาวของตัวรถ)

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= ma_x \\ a_x &= \dot{v}_x - v_y \dot{\psi} \\ m(\dot{v}_x - v_y \dot{\psi}) &= -(F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \sin \delta + (F_{f_{fl}} + F_{f_{fr}}) \cos \delta \\ &\quad + (F_{r_l} + F_{r_r})\end{aligned}\quad (3-1)$$

คิดผลของแรงตามแกน y (แนวตั้งฉากกับความยาวของรถ)

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= ma_y \\ a_y &= \dot{v}_y + v_x \dot{\psi} \\ m(\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) &= (F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \cos \delta + (F_{f_{fl}} + F_{f_{fr}}) \sin \delta \\ &\quad + (F_{r_l} + F_{r_r})\end{aligned}\quad (3-2)$$

คิดผลของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของรถ

$$\begin{aligned}\Sigma M_{CoG} &= I_z \ddot{\psi} \\ I_z \ddot{\psi} &= -(F_{y_{rl}} + F_{y_{rr}}) L_r + (F_{r_l} - F_{r_r}) \frac{B_r}{2} \\ &\quad + \left((F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \cos \delta + (F_{f_{fl}} + F_{f_{fr}}) \sin \delta \right) L_f \\ &\quad + \left((-F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \sin \delta + (F_{f_{fl}} - F_{f_{fr}}) \cos \delta \right) \frac{B_f}{2}\end{aligned}\quad (3-3)$$

จากสมการ (3-1), (3-2) และ (3-3) จะได้

$$\dot{v}_x = v_y \dot{\psi} - \frac{1}{m} \left[\begin{array}{c} (F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \sin \delta + (F_{f_{fl}} + F_{f_{fr}}) \cos \delta \\ + (F_{r_l} + F_{r_r}) \end{array} \right] \quad (3-4)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \dot{\psi} + \frac{1}{m} \left[\begin{array}{c} (F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}}) \cos \delta + (F_{f_{fl}} + F_{f_{fr}}) \sin \delta \\ + (F_{r_l} + F_{r_r}) \end{array} \right] \quad (3-5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} \left[\begin{array}{l} -(F_{y_{rl}} + F_{y_{rr}})L_r + (F_{rl} - F_{rr})\frac{B_r}{2} \\ + ((F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}})\cos\delta + (F_{fl} + F_{fr})\sin\delta)L_f \\ + ((-F_{y_{fl}} + F_{y_{fr}})\sin\delta + (F_{fl} - F_{fr})\cos\delta)\frac{B_f}{2} \end{array} \right] \quad (3-6)$$

และหากพิจารณาแล้ว จะพบว่า

$$\vec{V}_w = \vec{V}_{CoG} + \vec{\omega}_{car} \times \vec{r}$$

ดังนั้น จะได้ความเร็วล้อที่แต่ละล้อยังสมการที่ (3-7) - (3-10)

$$V_{wfl} = \left(v_x + \dot{\psi} \frac{B_f}{2} \right) \hat{i} + (v_y + \dot{\psi} L_f) \hat{j} \quad (3-7)$$

$$V_{wfr} = \left(v_x - \dot{\psi} \frac{B_f}{2} \right) \hat{i} + (v_y + \dot{\psi} L_f) \hat{j} \quad (3-8)$$

$$V_{wrl} = \left(v_x + \dot{\psi} \frac{B_r}{2} \right) \hat{i} + (v_y - \dot{\psi} L_r) \hat{j} \quad (3-9)$$

$$V_{wrr} = \left(v_x - \dot{\psi} \frac{B_r}{2} \right) \hat{i} + (v_y - \dot{\psi} L_r) \hat{j} \quad (3-10)$$

จากความสัมพันธ์

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_w \hat{j}}{V_w \hat{i}} \right)$$

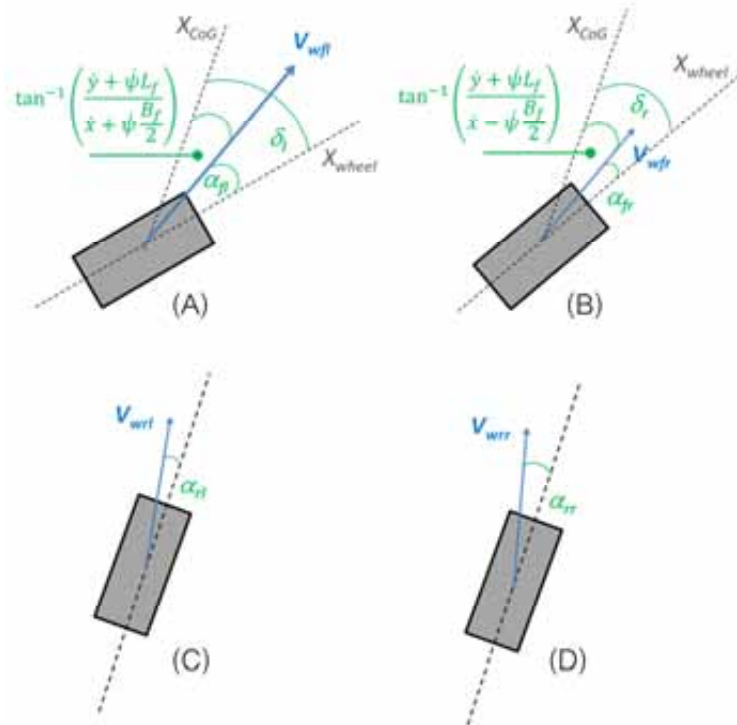
และจากภาพที่ 3-2 จะเห็นว่ามุมลื่นไถล $\alpha_f = \delta - \theta$ ดังนั้นพิจารณาที่ล้อแต่ละล้อจะได้มุมลื่นไถลดังสมการที่ (3-11) - (3-14)

$$\alpha_{fl} = \delta_l - \tan^{-1} \left(\frac{v_y + \dot{\psi} L_f}{v_x + \dot{\psi} \frac{B_f}{2}} \right) \quad (3-11)$$

$$\alpha_{fr} = \delta_r - \tan^{-1} \left(\frac{v_y + \dot{\psi} L_f}{v_x - \dot{\psi} \frac{B_f}{2}} \right) \quad (3-12)$$

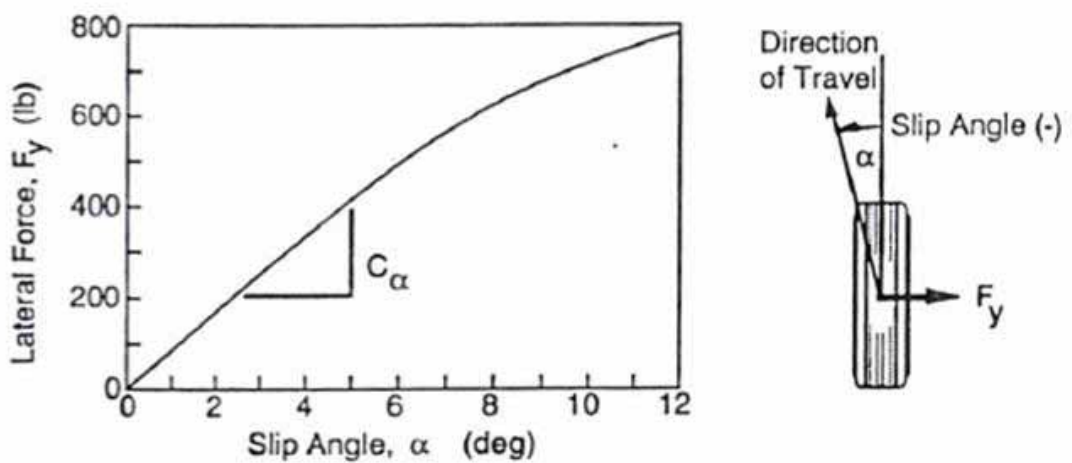
$$\alpha_{rl} = -\tan^{-1} \left(\frac{v_y - \dot{\psi} L_r}{v_x + \dot{\psi} \frac{B_r}{2}} \right) \quad (3-13)$$

$$\alpha_{rr} = -\tan^{-1} \left(\frac{v_y - \dot{\psi} L_r}{v_x - \dot{\psi} \frac{B_r}{2}} \right) \quad (3-14)$$



ภาพที่ 3-2 มุมลื่นไถลที่เกิดขึ้นที่แต่ละล้อ
(A, ล้อหน้าซ้าย, B.ล้อหน้าขวา, C.ล้อหลังซ้าย, D.ล้อหลังขวา)

จากภาพที่ 3-3 กำหนดให้แรงเฉื่อยด้านข้างที่กระทำต่อล้อทั้งสองมีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มุมลื่นไถลน้อยๆ ดังสมการที่ (3-15) - (3-18)



ภาพที่3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมลื่นไถล และแรงด้านข้าง[24]

$$F_{y_fl} = C_{af} \cdot \alpha_{fl} \quad (3-15)$$

$$F_{y_fr} = C_{af} \cdot \alpha_{fr} \quad (3-16)$$

$$F_{y_rl} = C_{ar} \cdot \alpha_{rl} \quad (3-17)$$

$$F_{y_rr} = C_{ar} \cdot \alpha_{rr} \quad (3-18)$$

โดย C_{ar} และ C_{ar} คือสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อหน้าและหลัง ตามลำดับอัตราการลื่นไถล (slip ratio) ที่ล้อ (S_{ij}) เป็นดังสมการที่ (3-19) – (3-22)

$$S_{fl} = \frac{|r_{eff} \cdot \omega_{wfl} - V_{wfl} \cos \alpha_{fl}|}{\max(r_{eff} \cdot \omega_{wfl}, V_{wfl} \cos \alpha_{fl})} \quad (3-19)$$

$$S_{fr} = \frac{|r_{eff} \cdot \omega_{wfr} - V_{wfr} \cos \alpha_{fr}|}{\max(r_{eff} \cdot \omega_{wfr}, V_{wfr} \cos \alpha_{fr})} \quad (3-20)$$

$$S_{rl} = \frac{|r_{eff} \cdot \omega_{wrl} - V_{wrl} \cos \alpha_{rl}|}{\max(r_{eff} \cdot \omega_{wrl}, V_{wrl} \cos \alpha_{rl})} \quad (3-21)$$

$$S_{rr} = \frac{|r_{eff} \cdot \omega_{wrr} - V_{wrr} \cos \alpha_{rr}|}{\max(r_{eff} \cdot \omega_{wrr}, V_{wrr} \cos \alpha_{rr})} \quad (3-22)$$

โดยที่ r_{eff} คือรัศมีล้อ และ ω_w คืออัตราเร็วเชิงมุมของล้อ

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน $\mu(S_{ij})$ และอัตราการลื่นไถล S_{ij} แสดงได้ดังสมการที่ (3-23)[13] ดังนี้

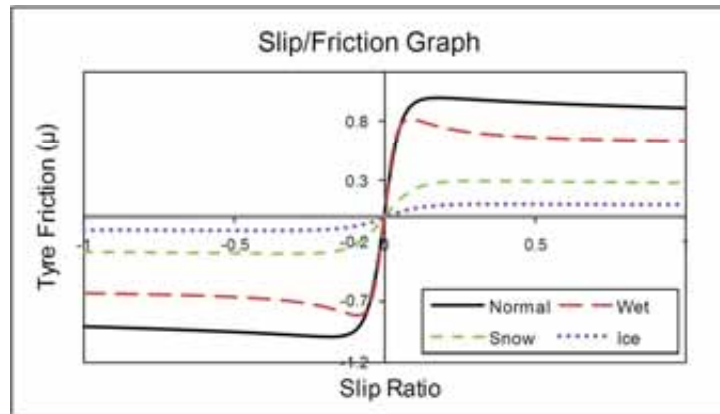
$$\mu_i(\lambda_i) = D \sin(C \tan^{-1}(B \lambda_i - E(B \lambda_i - \tan^{-1}(B \lambda_i)))) \quad (3-23)$$

เมื่อ $i = f, r$ โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับสมการที่ (3-23)[13][25]

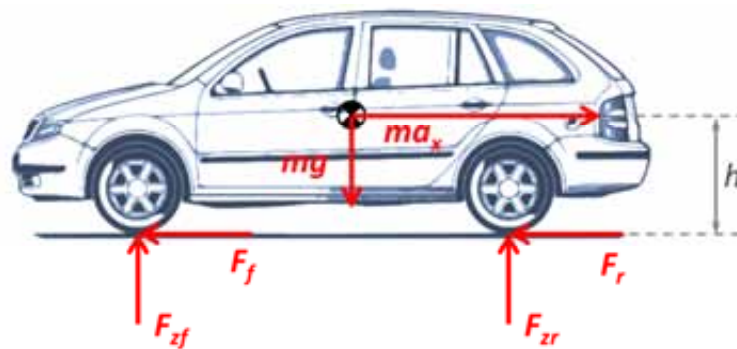
Pacejka Coefficients				
Surface	B	C	D	E
Dry Tarmac	10	1.9	1	0.97
Wet Tarmac	12	2.3	0.82	1
Snow	5	2	0.3	1
Ice	4	2	0.1	1

ผลจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากตารางที่ 3-1 สามารถแสดงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานในระนาบการหมุนของล้อและอัตราการลื่นไถลได้ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ_i และอัตราการลื่นไถล λ_i [17]

พิจารณาการถ่ายเทน้ำหนักเมื่อเกิดการเร่งหรือเบรก จากภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 การถ่ายเทน้ำหนักเมื่อเกิดการเร่งหรือเบรก

จะได้ความความสัมพันธ์ของแรงดังแสดงในสมการที่ (3-24) – (3-27)

$$F_{zf} = \frac{m}{L}(gL_r - \dot{v}_x h) \quad ; \quad F_{zf} = F_{zfl} = F_{zfr} \quad (3-24)$$

$$F_{zr} = \frac{m}{L}(gL_f + \dot{v}_x h) \quad ; \quad F_{zr} = F_{zrl} = F_{zrr} \quad (3-25)$$

โดยมีแรงเสียดทานตามแนวการวางตัวของล้อคือ

$$F_f = \mu(S_{ij})F_{zf} \text{sign}(r_{eff} \cdot \omega_{wf} - V_{wf} \cos \alpha_f) \quad ; \quad F_f = F_{fl} = F_{fr} \quad (3-26)$$

$$F_r = \mu(S_{ij})F_{zr} \text{sign}(r_{eff} \cdot \omega_{wr} - V_{wr} \cos \alpha_r) \quad ; \quad F_r = F_{rl} = F_{rr} \quad (3-27)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแกนของยานยนต์ xy และแกนอ้างอิง XY

จากภาพที่ 3-1 จะได้ความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ในแกนอ้างอิงดังสมการที่ (3-28) และ (3-29)

$$\dot{X} = v_x \cos \psi - v_y \sin \psi \quad (3-28)$$

$$\dot{Y} = v_x \sin \psi + v_y \cos \psi \quad (3-29)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่กระทำกับพวงมาลัยและมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย

จากสมการที่ (2-4) และ (2-5) ซึ่งเป็นสมการที่ประมาณจากความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Dahl ให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยได้ โดยเลือกใช้ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ของแรงบิดกับมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย แทนแรงที่กระทำกับระบบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงการกระจัด และแทนที่สัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งด้วยตัวแปรคงที่ใดๆ ที่ใช้สำหรับปรับปรุงรูปร่างของแบบจำลอง ดังแสดงในสมการที่ (3-30) และ (3-31)

$$\frac{dF}{dt} = \sigma_0 v_r (h - F \operatorname{sgn}(v_r))^\beta \quad (3-30)$$

$$h = \frac{1}{2} [(h_u + h_l) \operatorname{sgn}(v_r) + (h_u - h_l)] \quad (3-31)$$

เมื่อ $h_u(v_r) = av_r + b$

$h_l(v_r) = dv_r + e$

กำหนด h_u คือขอบเขตค่าแรงบิดสูงสุดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

h_l คือขอบเขตค่าแรงบิดสูงสุดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

F คือแรงบิดในระบบ

v_r คืออัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย

$a, b, d, e, \sigma_0, \beta$ คือตัวแปรปรับปรุงรูปร่างของกราฟ

ในการจำลองการเคลื่อนที่นั้นจะพิจารณาการวิ่งเลี้ยวโค้งที่ความเร็วคงที่ โดยจะใช้ข้อกำหนดและพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 3-2 ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ข้อกำหนดและพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองการเคลื่อนที่

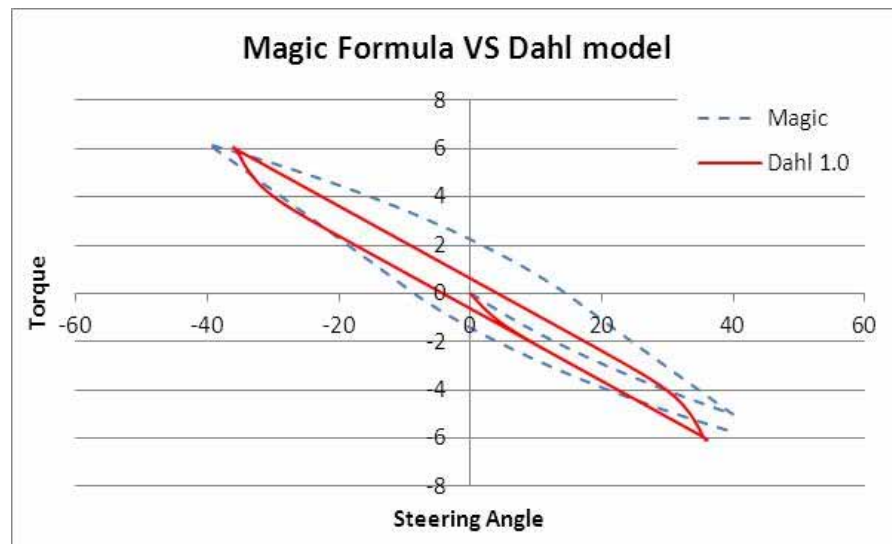
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้
1. มวลของรถ* (m)	กิโลกรัม (kg)	1,526
2. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตั้งของรถ* (I_z)	กิโลกรัม.เมตร ² (kg.m ²)	2,630
3. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตั้งของล้อ** (I_w)	กิโลกรัม.เมตร ² (kg.m ²)	1.8
4. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้า* (L_f)	เมตร (m)	1.10
5. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลัง* (L_r)	เมตร (m)	1.42
6. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของล้อหน้า (B_f)	เมตร (m)	1.50
7. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของล้อหลัง (B_r)	เมตร (m)	1.50
8. ระยะจากพื้นถึงศูนย์กลางมวล* (h)	เมตร (m)	1
9. รัศมีล้อ** (r_{eff})	เมตร (m)	0.3
10. Cornering Stiffness ล้อหน้า* (C_{af})	นิวตัน/เรเดียน (N/rad.)	21,000
11. Cornering Stiffness ล้อหลัง* (C_{ar})	นิวตัน/เรเดียน (N/rad.)	32,000
12. มุมเลี้ยวที่พวงมาลัยสูงสุด	เรเดียน (rad.)	3π
13. อัตราการเปลี่ยนมุมเลี้ยวสูงสุด	องศา/วินาที (deg./s)	124
14. แรงบิดสูงสุดที่พวงมาลัย	นิวตันเมตร (N.m)	64,000
15. ความเร็วของรถ	กิโลเมตร/ชั่วโมง (km/hr)	60
16. อัตราทดเกียร์		15
17. ค่าความชันขอบเขตบนของแรงบิด (a)		-0.15
18. ค่าคงที่ขอบเขตบนของแรงบิด (b)		-1
19. ค่าความชันขอบเขตล่างของแรงบิด (d)		-0.15
20. ค่าคงที่ขอบเขตล่างของแรงบิด (e)		1
21. ค่าคงที่สำหรับสร้างแบบจำลองแรงบิด (σ_0)		0.4
22. ตัวแปรปรับปรุงแบบจำลองแรงบิด (β)		0.5, 1.5

*Noomwongs N., Yoshida H., Nagai M., Kobayashi K., Yokoi T.[26]

**กนกกร เปี่ยมเชาว์, ทิพวรรณ ชัยนำยนต์, ภูบัติ วณิชชาธรรมกุล และภูวเดช ฉัตรพรณกุล[20]

จากการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองแรงบิดที่ใช้ให้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้จาก

สมการพิเศษ (2-6) ถึง (2-8) ดังแสดงในภาพที่ 3-6 ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและองศาการเลี้ยวที่พวงมาลัย มีความใกล้เคียงกัน จึงถือว่าจะสามารถนำแบบจำลอง Dahl ที่ประมาณความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นมาใช้ในงานวิจัยได้



ภาพที่ 3-6 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมเลี้ยวที่ได้จากแบบจำลองจากสมการพิเศษ (เส้นประ) และแบบจำลอง Dahl ที่ประมาณความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (เส้นทึบ)

3.2 ระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL

การสื่อสารภายในชุดทดสอบ คือการรับ-ส่งข้อมูลภายในระบบระหว่างอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกัน โดยจากจุดประสงค์ในการพัฒนาชุดทดสอบ HHIL จากเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ และชุดทดสอบ HIL-Hardware เดิม นั้น อุปกรณ์ประมวลผล (Processor) ของระบบจะต้องทำหน้าที่จำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ HIL-Hardware และเครื่องจำลองการขับขี่ยานยนต์ และแสดงผลสภาพการขับขี่ (visual environment) อีกทั้งการทำงานของชุดทดสอบ HHIL นั้น เป็นการทำงานแบบเวลาจริง ทำให้ต้องออกแบบระบบการส่งผ่านข้อมูลอย่างระมัดระวัง เพราะความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นผลให้ระบบการสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL โดยรวมมีประสิทธิภาพลดลง หรืออาจทำให้ผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบ HHIL ไม่สามารถประมวลผลแบบเวลาจริงได้ ดังนั้น การเลือกใช้ระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL ต้องพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผลที่เหมาะสม และช่องทางในการรับ-ส่งข้อมูลที่มีความเร็วเพียงพอ

3.2.1 การพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผล

การออกแบบระบบสื่อสารในเบื้องต้น ออกแบบให้ใช้อุปกรณ์ประมวลผลที่มีอยู่เดิม เนื่องจากระบบเดิมมีเสถียรภาพที่ดีอยู่แล้ว ซึ่งอุปกรณ์ประมวลผลเดิมที่มีอยู่ คือ NI CompactRIO, dSPACE DS1104 และคอมพิวเตอร์ จากการเปรียบเทียบความสามารถในการประมวลผลและช่องทางที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล ดังแสดงตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้งานอยู่เดิม

ด้านที่พิจารณา	การประมวลผล	ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูล
NI CompactRIO (cRIO-9072/3/4)	ประกอบด้วย FPGA technology และใช้ 400 MHz Freescale MPC5200processor	รองรับ โมดูลช่องสัญญาณทั้งหมด 8 โมดูล
DSP Board (dSPACE DS1104)	เป็น real time OS มีการดำเนินการแบบ DSP	<ul style="list-style-type: none"> ● A/D 8 channels ● D/A 8 channels ● Digital I/O 20-bit parallel ● Slave I/O PWM ● Inc 2 independent channels ● RS232, RS422, RS485
PC (Intel® PRO/1000 GT Desktop Adapter)	ขึ้นอยู่กับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งการ์ดนี้	Network Communication rates 10/100/1000 Mbps, auto-negotiated

จากตารางที่ 3-3 สามารถออกแบบระบบการสื่อสารภายในชุดทดสอบได้ 2 รูปแบบหลัก นั่นคือใช้อุปกรณ์ประมวลผลเครื่องเดียว หรือ หลายเครื่องพร้อมกัน โดยเมื่อพิจารณาจากการทำงานของเครื่องจำลองการชีรณยนต์ และชุดทดสอบ HIL-Hardware เดิม พบว่าเครื่องทดสอบทั้งสอง สามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2000 และ 500 Hz หรือสามารถทำงานได้ 2000 และ 500 รอบต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทำงานเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการทำงานร่วมกันระหว่างชิ้นงานจริง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาการพัฒนาชุดทดสอบ HHIL ซึ่งเป็นการ

ทำงานร่วมกันของชุดทดสอบทั้งสอง ในขั้นต้นจึงควรใช้อุปกรณ์ประมวลผลเดิมที่มีอยู่ โดยประมาณได้ว่าชุดทดสอบจะสามารถทำงานได้ที่ความเร็ว 500 Hz เป็นอย่างน้อย ซึ่งเป็นเหตุผลในการพิจารณาตัดทางเลือกการเลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผลเครื่องเดียวออก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผลแบบหลายเครื่องพร้อมกัน

พิจารณาจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ประมวลผล และหน้าที่ของอุปกรณ์ประมวลผล สำหรับชุดทดสอบ HHIL สามารถเลือกการทำงานได้หลายรูปแบบ โดยพิจารณาจากความสามารถในการประมวลผล และช่องทางในการสื่อสารระหว่างกัน

ความสามารถในการประมวลผล

dSPACE มีข้อได้เปรียบในด้านการประมวลผล เพราะใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing; DSP) เป็นการประมวลผลแบบเวลาจริงซึ่งเร็วกว่าการประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งจำกัดด้วยความเร็วของ OS ที่ใช้ แต่หากใช้คอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริง (PC running real-time program) ก็สามารถนำมาใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้เช่นกัน เช่น การประยุกต์ใช้ระบบทำงานแบบเวลาจริงของโปรแกรม MATLAB ที่เรียกว่า xPC ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบฝังตัว (embedded system) ก็เป็นแนวทางหนึ่งในการใช้คอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริง

ช่องทางในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล

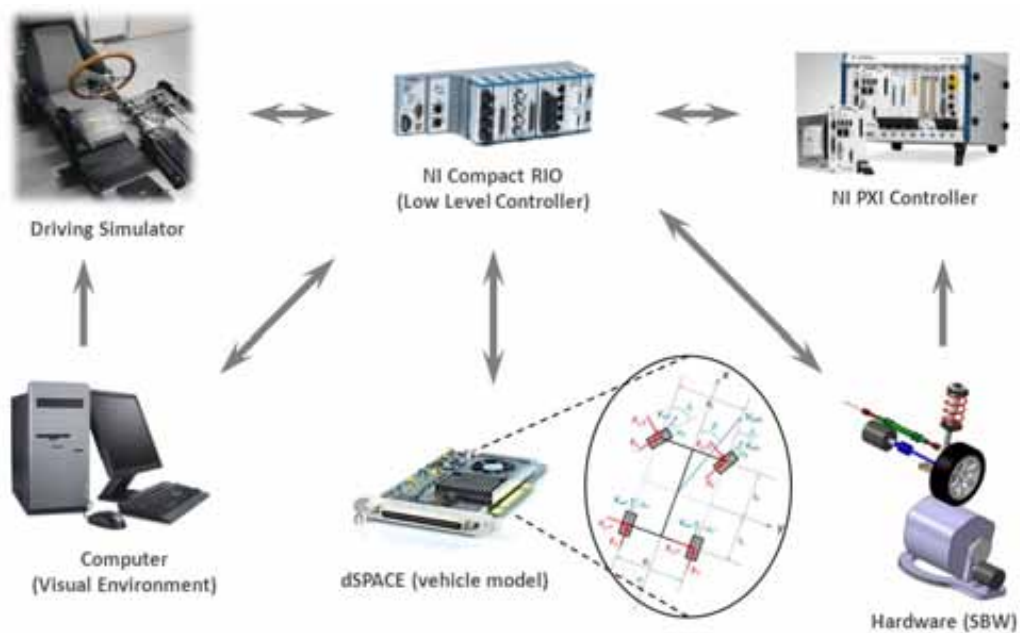
NI CompactRIO มีข้อได้เปรียบในด้านของช่องสัญญาณที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล เพราะมีลักษณะเป็นช่องว่างสำหรับเลือกใช้โมดูลที่มีลักษณะของช่องสัญญาณที่หลากหลาย ในขณะที่ dSPACE มีช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลที่จำกัด เช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์ที่ทำงานแบบเวลาจริง ซึ่งจำกัดช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลด้วยลักษณะของการ์ดและโปรแกรมที่นำมาใช้

ด้วยคุณสมบัติของอุปกรณ์ประมวลผล และความต้องการในด้านเสถียรภาพเดิมของระบบดังกล่าว แกนหลักที่ใช้ในระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL นั้นจึงพิจารณาเลือกใช้ NI CompactRIO เพื่อรับ-ส่งข้อมูล แต่ในส่วนของการประมวลผลนั้น อาจเลือกใช้ dSPACE หรือคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ที่สามารถทำประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเลือกใช้ NI PXI Controller จัดการกับสัญญาณค่าแรงที่กระทำที่ยาง (ชิ้นส่วนจริง) เช่นเดียวกับชุดทดสอบ HIL-Hardware เดิมที่มีการใช้งานก่อนหน้า ซึ่งค่าแรงที่ได้จากการตรวจวัดและสอบเทียบค่าแล้ว จะถูกนำไปใช้ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในเวลาต่อมา

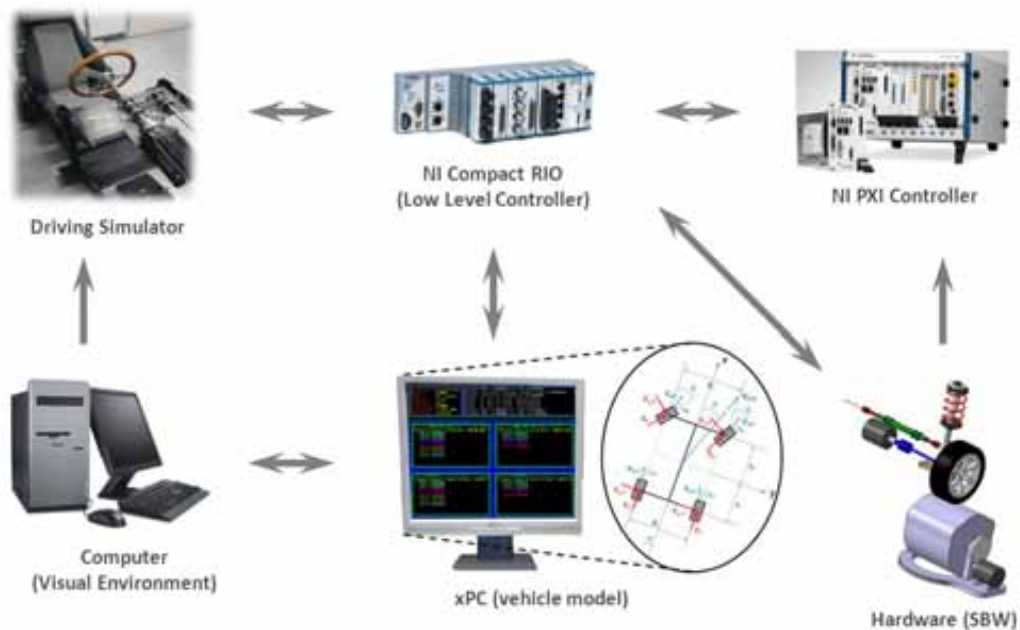
ในส่วนของการแสดงผลสภาพการขับเคลื่อน เลือกใช้คอมพิวเตอร์ในการแสดงผลทางภาพ และเสียง โดยเลือกใช้ OpenGL library ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบมาตรฐานเปิด (open source)

โดยสามารถเขียนให้ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ประมวลผลชนิดใดก็ได้ เน้นไปทางด้าน GPU (Graphics Processing Unit) นอกจากนี้ การใช้คอมพิวเตอร์ในการแสดงผลภาพการขับขี่ ยังมี การจัดการอินเทอร์เฟซ (interface) ที่ดีอีกด้วย

โดยสรุปแล้ว สามารถออกแบบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL ได้ 2 รูปแบบ ซึ่งแตกต่างกันที่อุปกรณ์ในการประมวลผลหลัก ที่ใช้จำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ นั่นคือ เลือกใช้ระหว่าง dSPACE หรือ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ดังแสดงในภาพที่ (3-7) และ (3-8) ตามลำดับ โดยใช้ระบบการจัดการสัญญาณและการควบคุมการทำงานของชุดทดสอบเหมือนกัน โดยใช้ NI CompactRIO เป็นอุปกรณ์ประมวลผลระดับรอง เพื่อใช้เป็นแกนหลักในการรับ-ส่งข้อมูล และใช้ NI PXI Controller จัดการกับสัญญาณค่าแรงที่เกิดขึ้น และบันทึกข้อมูล และใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งมี OpenGL library ในการแสดงผลภาพการขับขี่ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3-7 แผนผังการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยใช้อุปกรณ์ประมวลผลหลักเป็น dSPACE



ภาพที่ 3-8 แผนผังการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HIL โดยใช้อุปกรณ์ประมวลผลหลักเป็น คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง

การพิจารณาเลือกอุปกรณ์ประมวลผลหลัก ระหว่าง dSPACE หรือ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง นั้น สามารถพิจารณาได้จากช่องทางการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล ซึ่งมีความแตกต่างกันตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ประมวลผล ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยพิจารณาเลือกอุปกรณ์ประมวลผลหลักจากการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลหลักและ NI CompactRIO ซึ่งทั้งสองแนวทางนั้น เนื่องจากช่องทางการสื่อสารที่ต่างกัน ทำให้จำนวนข้อมูลมีการรับ-ส่งไม่เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร โดยอ้างอิงจากสถานการณ์การทำงานจริง

3.2.2 การพิจารณาเลือกช่องทางการรับ-ส่งข้อมูล

การส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันในชุดทดสอบ จะต้องสามารถส่งผ่านข้อมูลได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ อีกทั้งจะต้องสามารถส่งข้อมูลออกได้จำนวนมากในเวลาที่กำหนด นั่นคือ จะต้องมีความเร็วในการรับ-ส่งสัญญาณที่เพียงพอในการจำลองสภาพทางพลศาสตร์ยานยนต์แบบเวลาจริง ซึ่งช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ประมวลผลที่เลือกใช้ จากการออกแบบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HIL ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่ามีความแตกต่างกันที่อุปกรณ์ประมวลผลหลัก นั่นคือ dSPACE และ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ซึ่งมีช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลเป็น RS232 และ TCP/UDP ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของช่องทางดังกล่าว ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน

ช่องทาง TCP/UDP สามารถส่งข้อมูลได้เร็วกว่าในจำนวนข้อมูลที่เท่ากันเมื่อพิจารณาในแง่ของคุณสมบัติของช่องทางการสื่อสาร แต่เนื่องจากการใช้ช่องทาง TCP/UDP นั้น จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ประมวลผลจาก dSPACE เป็นคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพในการทำงานแต่เดิมของเครื่องจำลองการขับซีรยนต์เปลี่ยนไปได้ อย่างไรก็ตาม หากการรับ-ส่งข้อมูลผ่านช่องทาง RS232 สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วที่เหมาะสมแล้วนั้น การเลือกใช้ dSPACE เป็นอุปกรณ์ประมวลผลหลักอาจเหมาะสมกว่าการใช้คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง เมื่อพิจารณาด้านเสถียรภาพในการทำงานของระบบโดยรวม ดังนั้นการเลือกระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HIL ที่เหมาะสมจึงต้องทำการทดสอบช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลภายในระบบก่อนเป็นสำคัญ

จำนวนข้อมูลที่มีการรับ-ส่งภายในชุดทดสอบนั้น พิจารณาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ในด้านของจำนวนตัวแปรที่ต้องมีการส่งออกและนำเข้าระหว่างอุปกรณ์ภายในระบบ เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวต้องใช้ประมวลผลผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด โดยเลือกใช้แบบจำลองยานยนต์แทนที่แบบจำลองจักรยานที่ใช้แต่เดิม เพื่อรองรับการจำลองการโคลงแบบ pitch และ roll สำหรับเครื่องจำลองการขับซีรยนต์ที่กำลังพัฒนาขึ้น และกำหนดให้เป็นรถขับเคลื่อนล้อหน้า ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องจำลองการขับซีรยนต์ และชุดทดสอบ HIL-Hardware มีจำนวนแตกต่างกัน ดังนี้

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. มุมเลี้ยวที่พวงมาลัย | (จากเครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 2. อัตราการเหยียบคันเร่ง | (จากเครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 3. อัตราการเหยียบเบรก | (จากเครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 4. มุม roll ของรถยนต์ | (จากเครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 5. มุม pitch ของรถยนต์ | (จากเครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 6. การสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย | (ไปที่เครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 7. การสร้างมุม roll ของรถยนต์ | (ไปที่เครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 8. การสร้างมุม pitch ของรถยนต์ | (ไปที่เครื่องจำลองการขับซีรยนต์) |
| 9. มุมลื่นไถลของยาง | (ไปที่ชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 10. อัตราการลื่นไถลของยาง | (ไปที่ชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 11. ความเร็วล้อรถในแกน x ของยาง | (ไปที่ชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 12. มุมเลี้ยวของล้อ | (ไปที่ชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 13. แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อแกน x | (จากชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 14. แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อแกน y | (จากชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 15. แรงปฏิกิริยาที่กระทำที่ล้อแกน z | (จากชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 16. แรงบิดที่ล้อรอบแกน x | (จากชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 17. แรงบิดที่ล้อรอบแกน y | (จากชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware) |
| 18. ระยะเคลื่อนที่ในแกน X | (ไปที่คอมพิวเตอร์แสดงผลสภาพการขับขี่) |
| 19. ระยะเคลื่อนที่ในแกน Y | (ไปที่คอมพิวเตอร์แสดงผลสภาพการขับขี่) |
| 20. ระยะเคลื่อนที่ในแกน Z | (จากคอมพิวเตอร์แสดงผลสภาพการขับขี่) |
| 21. มุม yaw | (ไปที่คอมพิวเตอร์แสดงผลสภาพการขับขี่) |

3.2.3 การทดสอบช่องทางสื่อสารหลักของชุดทดสอบ HHIL

จากเดิมการทำงานของเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์ และชุดทดสอบ HIL-Hardware สามารถทำงานได้โดยมีการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วประมาณ 500 และ 2000 ครั้งต่อวินาที ตามลำดับ (500 Hz, 2000Hz) จึงคาดหวังว่าการทำงานของชุดทดสอบ HHIL ที่พัฒนาขึ้น จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วไม่น้อยกว่า 500 ครั้งต่อวินาที ซึ่งถือเป็นความเร็วในการทำงานแบบเวลาจริงร่วมกับชิ้นส่วนจริงที่ยอมรับได้ในเบื้องต้น ดังนั้นในการทดสอบ จึงเลือกขนาดของข้อมูลที่ส่งนั้นกำหนดให้มีขนาดเท่ากับสถานการณ์การทำงานจริง โดยกำหนดให้ข้อมูลเป็นชนิด double ขนาด 4 bytes (32 bits) ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากการรับ-ส่งข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน สำหรับสถานการณ์จริงจะได้ว่า

- การรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง NI CompactRIO และ dSPACE

เนื่องจาก dSPACE ไม่สามารถส่งข้อมูลระยะเคลื่อนที่ในแกน XY และมุม yaw ไปที่คอมพิวเตอร์ที่แสดงผลการขับขี่ได้โดยตรง ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงต้องส่งผ่านไปที่ NI compactRIO ก่อน ซึ่งทำให้มีจำนวนข้อมูลที่ต้องรับ-ส่งทั้งหมด 21 ข้อมูล รวมขนาด 84 ไบต์ โดยส่งผ่านช่องทางการสื่อสารประเภท RS232

- การรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง NI CompactRIO และ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง

เนื่องจาก คอมพิวเตอร์ทำงานจริงสามารถส่งข้อมูลระยะเคลื่อนที่ในแกน XY และมุม yaw ไปที่คอมพิวเตอร์ที่แสดงผลการขับขี่ได้โดยตรง ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ต้องรับ-ส่งจึงมีทั้งหมด 17 ข้อมูล รวมขนาด 68 ไบต์ โดยส่งผ่านช่องทางการสื่อสารประเภท TCP/UDP

3.2.3.1 การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232

การทดสอบนี้ ต้องการรับและส่งข้อมูลภายในเวลาเดียวกัน โดยจะบันทึกค่าที่มีการรับ-ส่งระหว่าง NI CompactRIO และ dSPACE พร้อมกับค่าของเวลา จากนั้นเปลี่ยนค่าความเร็วในการส่งให้เพิ่มขึ้น จนสังเกตเห็นข้อมูลที่รับมีค่าผิดพลาด จากนั้นจึงคำนวณความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลเพื่อพิจารณาต่อไป

1) โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ NI CompactRIO และ dSPACE

โปรแกรมที่อุปกรณ์ประมวลผลที่ NI CompactRIO และ dSPACE รองรับนั้น คือ โปรแกรม NI LabVIEW[®] และ MATLAB[®] Simulink ตามลำดับ ซึ่งเป็นโปรแกรมลักษณะภาษาภาพ (graphical language) ที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและมีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้ยังช่วยลดงานในการเขียนโปรแกรมในส่วนควบคุมการแสดงผล (Graphic User Interface - GUI) ลงได้อย่างมากอีกด้วย โดยโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์ประมวลผลทั้งสองจะแตกต่างกันตามบทบาทและหน้าที่การทำงานในชุดทดสอบ HHIL

การเขียนโปรแกรมเพื่อการทดสอบสำหรับ NI CompactRIO นี้จะกระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ notebook ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows และโปรแกรม NI LabVIEW[®] ไว้ จากนั้นจะถ่ายโอนโปรแกรมที่เสร็จสมบูรณ์ไปที่ NI CompactRIO ผ่านทางสายสื่อสาร TCP/IP โดยกำหนด IP address ของ NI CompactRIO และ เครื่องคอมพิวเตอร์ notebook ดังนี้

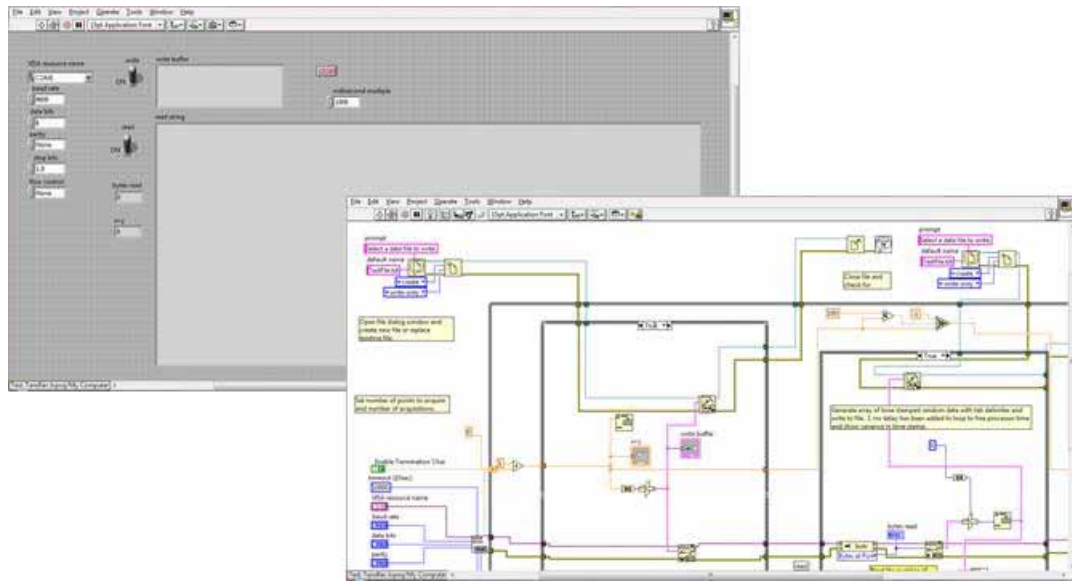
- NI CompactRIO

Primary address : 192.168.1.30

* NI CompactRIO มีช่องทางการสื่อสารประเภท TCP 2 ช่อง

- Notebook : 192.168.1.31

เมื่อพิจารณาหน้าที่การทำงานของ NI CompactRIO ในระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL โดยรวมแล้ว จะเห็นว่า NI CompactRIO จะต้องส่งข้อมูลให้กับ dSPACE ก่อนเพื่อนำไปคำนวณบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงรับค่ากลับมาเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของชิ้นส่วนจริงของชุดทดสอบ HIL-Hardware และเครื่องจำลองการขับเคลื่อน ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมเพื่อการทดสอบนี้ จึงกำหนดให้มีการสร้างสัญญาณใดๆ เพื่อแทนสัญญาณจริงที่จะได้จากเครื่องจำลองการขับเคลื่อน, การส่งค่าออกให้กับ dSPACE, และการรับค่ากลับเข้ามา โดยทุกครั้งที่มีการรับ-ส่งข้อมูลจะต้องมีการบันทึกค่าไว้ ลักษณะของโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม NI LabVIEW[®] แสดงในภาพที่ 3-9

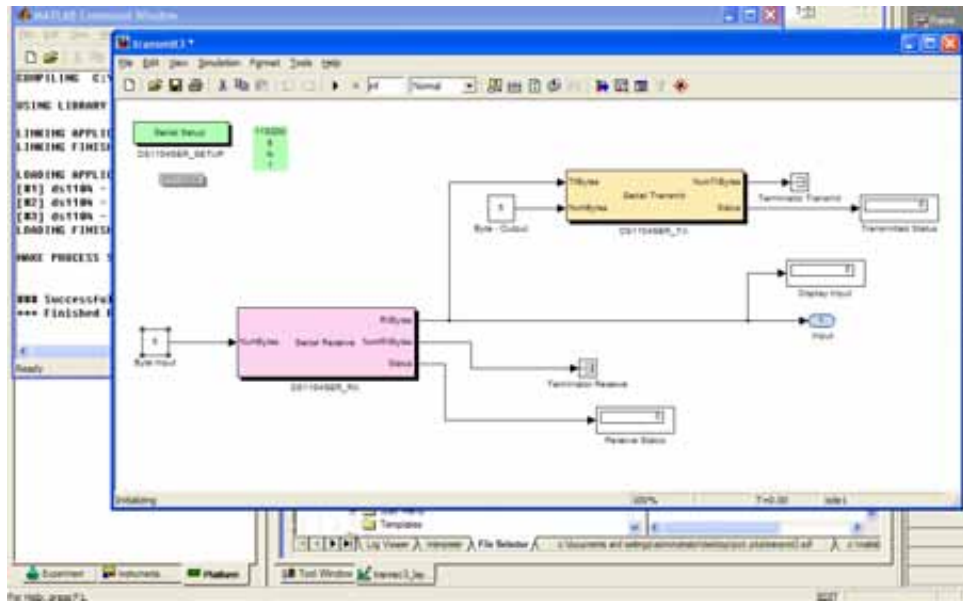


ภาพที่ 3-9 โปรแกรมที่ใช้เพื่อการทดสอบ ซึ่งถ่ายโอนไปที่ NI CompactRIO

การควบคุมการทำงานของโปรแกรม สามารถกระทำบนคอมพิวเตอร์ notebook โดยตรง ในส่วนของ front panel สำหรับการบันทึกค่าที่มีการรับ-ส่งนั้น กำหนดให้มีการบันทึกไว้ที่ คอมพิวเตอร์ notebook เพื่อนำค่าที่บันทึกมาพิจารณาความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลในเวลาต่อไป โดยเปรียบเทียบจากการตกลงของข้อมูลระหว่างการรับ-ส่งของอุปกรณ์ประมวลผลหลักทั้งสอง

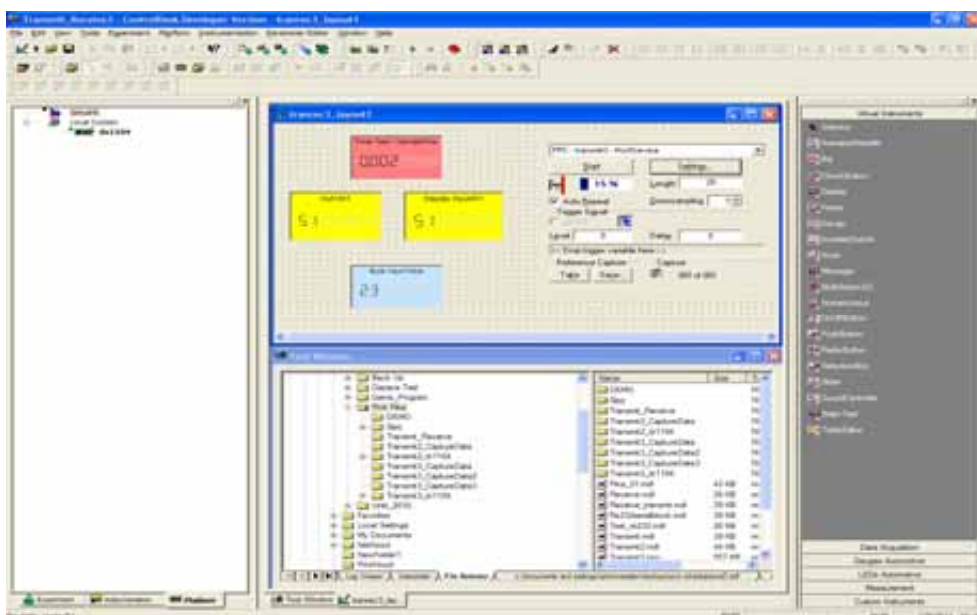
การเขียนโปรแกรมเพื่อการทดสอบสำหรับ dSPACE นั้น จะสร้างโปรแกรมเพื่อการ ทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows และโปรแกรม MATLAB® Simulink ไว้ จากนั้นจะถ่ายโอนโปรแกรมที่เสร็จสมบูรณ์ไปที่ dSPACE ผ่านทาง ช่องสัญญาณ PCI Bus โดยที่ card DS1104 เชื่อมต่อกับกล่องช่องสัญญาณ

dSPACE จะประมวลผลแบบจำลองที่ได้รับการถ่ายโอนมานับตั้งแต่ส่งมาจากเครื่อง คอมพิวเตอร์เสร็จ ซึ่งจะทำงานแยกส่วนกับคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่ เมื่อพิจารณาหน้าที่การ ทำงานของ dSPACE ในระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL โดยรวมแล้วจะเห็นว่า dSPACE จะรับ ค่าจาก NI CompactRIO มาเพื่อประมวลผลบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงส่งที่ทำการคำนวณแล้วกลับไปให้ NI CompactRIO ดังนั้น จึงสร้างโปรแกรมเพื่อการทดสอบโดย กำหนดให้มีการรับสัญญาณจาก NI CompactRIO, บันทึกค่าที่ได้รับ และส่งกลับไป ตามลำดับ ลักษณะของโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB® Simulink ดังแสดงในภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 โปรแกรมที่ใช้เพื่อการทดสอบ ซึ่งถ่ายโอนไปที่ dSPACE

ในการควบคุมการทำงานและบันทึกค่าที่ได้จากโปรแกรมบน dSPACE นี้ไม่สามารถทำได้โดยตรง แต่ต้องใช้โปรแกรมช่วย เป็นสื่อกลางระหว่างผู้ใช้งานกับ dSPACE นั่นคือ โปรแกรม ControlDesk ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ซึ่งออกแบบมาให้รองรับการทำงานของโปรแกรม MATLAB® Simulink ทำหน้าที่แสดงการทำงาน หรือการประมวลผลภายใน dSPACE, เป็นสื่อกลางในการควบคุมค่าใดๆบนโปรแกรม และบันทึกค่าตัวแปรที่สนใจ ซึ่งเป็นค่าที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลในลำดับต่อไป



ภาพที่ 3-11 โปรแกรม ControlDesk ที่เป็นสื่อกลางระหว่างผู้ใช้งานกับ dSPACE

2) ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล

ทำการพิจารณาค่าความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลเบื้องต้น โดยการคำนวณจากความสามารถของช่องทางสื่อสาร RS232 โดยจากตารางที่ 3-3 พบว่า RS232 สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 115200 bps เมื่อคำนวณโดยใช้จำนวนข้อมูลที่ส่งผ่าน 21 ข้อมูล รวมขนาด 84 ไบต์ จะได้ว่าสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้โดยใช้เวลาการชักตัวอย่าง (sampling time) ความเร็วสูงสุดประมาณ 0.0058 วินาที หรืออัตราเร็วสูงสุด (sampling rate) 171.43 Hz โดยคำนวณจากสมการที่ 3-32

$$\text{sampling rate} = \frac{\text{Maximum size of data}}{\text{time}} \times \frac{1}{\text{size of data}} \quad (3-32)$$

$$\text{sampling rate} = \frac{115200 \text{ bits}}{1 \text{ sec}} \times \frac{1}{84 \text{ bytes}} \times \frac{1 \text{ byte}}{8 \text{ bits}}$$

$$\text{sampling rate} = 171.43 \text{ s}^{-1}$$

นั่นคือ เมื่อการทดสอบจริงความเร็วสูงสุดจะไม่เกิน 0.0058 วินาทีเนื่องจากการรับ-ส่งข้อมูลผ่านสายสื่อสาร RS232 นั้น ไม่มีความยุ่งยากในส่วนของอุปกรณ์ (hardware) จึงมุ่งสนใจไปที่ความสามารถของชุดคำสั่ง (software) ที่ใช้ในการทำงาน แนวคิดหลักในการทดสอบคือความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลในระบบ จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับความเร็วในการรับ-ส่งของสายสัญญาณ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่มีการรับ-ส่งไม่เกิดการตกหล่นหรือสูญหายโดยการทดสอบพบว่า สามารถส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลทั้งสองโดยผ่านสายสื่อสาร RS232 ได้ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลระหว่าง NI CompactRIO และ dSPACE

Sampling time (μs)	ข้อมูลที่ส่งออกจาก NI CompactRIO	ข้อมูลที่ถูกอ่านโดย dSPACE	ข้อมูลที่ส่งออกจาก dSPACE	ข้อมูลที่ถูกอ่านโดย NI CompactRIO
6000	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 9 10 10 ...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	Unable to response
8000	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 10 10...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12...
10000	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...

พิจารณาผลการทดสอบจากตารางที่ 3-4 พบว่า ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 6000 และ 8000 ไมโครวินาที ข้อมูลที่ dSPACE อ่านได้มีการอ่านค่าบางข้อมูลช้า นั่นคือ ความเร็วการอ่านค่าของ dSPACE อ่านได้เร็วกว่าที่ NI CompactRIO ส่ง แต่ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 10000 ไมโครวินาที ข้อมูลที่ dSPACE อ่านได้ตรงกับข้อมูลที่ NI CompactRIO ส่งออกมา เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ถูกรับส่งออกจาก dSPACE ไปที่ NI CompactRIO พบว่าที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 6000 ไมโครวินาที NI CompactRIO ไม่สามารถตอบสนองต่อการทำงาน ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 8000 ไมโครวินาที ข้อมูลที่ NI CompactRIO อ่านได้มีการอ่านค่าบางข้อมูลสูญหาย แต่ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 10000 ไมโครวินาที ข้อมูลที่ NI CompactRIO อ่านได้ตรงกับข้อมูลที่ dSPACE ส่งออกมา จึงสามารถสรุปได้ว่าการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทาง RS232 ระหว่าง NI CompactRIO และ dSPACE ได้ด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ 10 มิลลิวินาที หรือ 100 Hz โดยคำนวณจากสมการที่ 3-33

$$\text{sampling rate} = \frac{1}{\text{sampling time}} \quad (3-33)$$

$$\text{sampling rate} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100 \text{ s}^{-1}$$

จากผลการทดลอง พบว่าความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลหลัก น้อยกว่าค่าความเร็วที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นการใช้ช่องทางสื่อสารประเภท RS232 ในงานวิจัยนี้ จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา แต่สามารถเป็นแนวทางสำรองที่อาจสามารถนำมาใช้ได้กรณีที่ไม่ต้องการ ความเร็วในการทำงานสูงนัก หรือใช้ในกรณีที่จำนวนข้อมูลที่มีการรับ-ส่งมีจำนวนน้อย

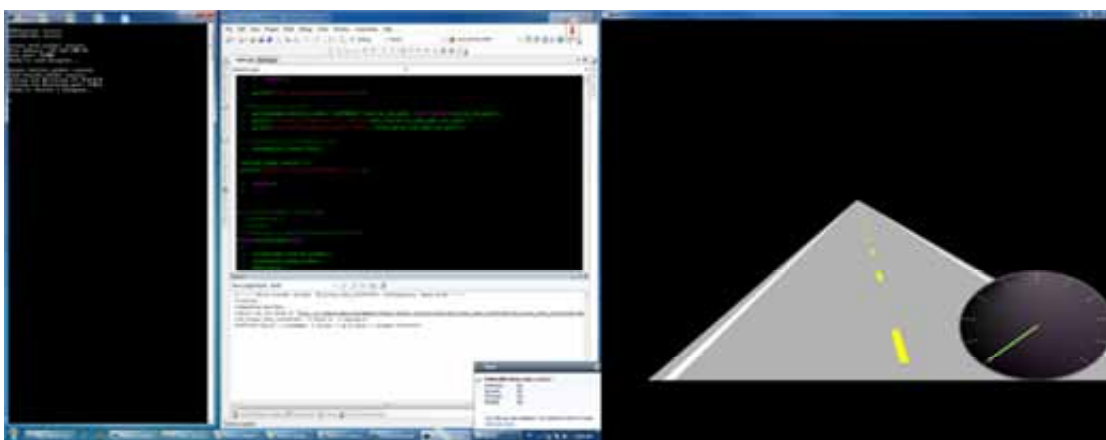
3.2.3.2 การทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP

การทดสอบนี้ ต้องการรับและส่งข้อมูลภายในเวลาเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า จะมีการบันทึกค่าที่มีการรับ-ส่งระหว่าง NI CompactRIO และ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง พร้อมกับค่าของเวลา จากนั้นเปลี่ยนค่าความเร็วในการส่งให้เพิ่มขึ้น จนกระทั่งสังเกตพบข้อมูลที่รับมีค่าผิดพลาด จากนั้นจึงคำนวณความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลเพื่อพิจารณาต่อไป

1) โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ NI CompactRIO คอมพิวเตอร์ทำงาน เวลาจริงและคอมพิวเตอร์แสดงผลการซักรับ

อุปกรณ์ประมวลผลที่ NI CompactRIO นั้น ใช้โปรแกรม NI LabVIEW[®] สำหรับ ออกแบบการควบคุม ส่วนของคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงนั้น เลือกใช้ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB[®] Simulink ชื่อ xPC ในการสร้างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ที่ใช้โปรแกรมลักษณะ

ภาษาภาพ เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า ในส่วนของคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่นั้น ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio ซึ่งพัฒนาโดยใช้ภาษา C (C language) และ OpenGL library ในการแสดงผล ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ในงานวิจัยนี้ การแสดงผลทางคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่นี้ ได้รับความช่วยเหลือด้านการพัฒนาโปรแกรม และจัดการเครือข่ายการสื่อสารจากหม่อมหลวงรัตนพงษ์ ชยางกูร และกลุ่มนิสิต ISE (International School of Engineering) ผู้ร่วมทำงานวิจัย โดยโปรแกรมหักกล่าวถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อการวิจัยยานยนต์ทั้งทางด้านระบบบังคับด้วยไฟฟ้า และด้านพลังงานที่ใช้ในการขับชี่ (Economic driving)



ภาพที่ 3-12 การแสดงผลลักษณะการขับชี่โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio

โดยลักษณะของช่องทางการสื่อสารของคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่นั้น ขึ้นอยู่กับ NIC (Network Interface Card) ที่นำมาติดตั้ง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Intel® PRO/1000 GT Desktop Adapter ซึ่งเป็นช่องทางการสื่อสารแบบ TCP มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3-3

เนื่องจากการใช้ NI CompactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ต้องใช้การสื่อสารประเภท TCP ซึ่งมีจำนวนช่องจำกัด ดังนั้นจึงใช้ระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายอีเทอร์เน็ต โดยมีฮับ (HUB หรือ Repeater) ทำหน้าที่ในการจัดการช่องทางการสื่อสารด้วยฟังก์ชันการเจรจาอัตโนมัติ (Auto-Negotiation) ซึ่งทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ความเร็วสูงสุดของอุปกรณ์ทั้งสองที่รองรับ เนื่องจากการเขียนโปรแกรมเพื่อการทดสอบสำหรับ NI CompactRIO นี้ต้องกระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ notebook เพื่อควบคุมผ่านทางสายสื่อสาร TCP/IP หนึ่งในสองช่องทางที่มีใน NI CompactRIO ดังนั้น IP address ของ NI CompactRIO ช่องที่สอง คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่ กำหนดดังนี้

- NI CompactRIO
 - Primary address : 192.168.1.30
 - Secondary address : 192.168.100.30
- Notebook : 192.168.1.31
- คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง : 192.168.100.42
- คอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่ : 192.168.100.50

เมื่อพิจารณาลำดับการรับ-ส่งข้อมูล จะเห็นว่า NI CompactRIO จะต้องส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงเพื่อจำลองลักษณะทางพลศาสตร์ยานยนต์ จากนั้นจึงส่งค่าไปแสดงผลที่คอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่ และส่งกลับไปที่ NI CompactRIO อีกครั้งเพื่อนำไปสร้างสัญญาณในการควบคุมเครื่องจำลองการขับชี่รถยนต์และชิ้นส่วนจริงของระบบบังคับด้วย

ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมเพื่อการทดสอบนี้ จึงกำหนดให้มีการสร้างสัญญาณใดๆ เพื่อแทนสัญญาณจริงที่จะได้จากเครื่องจำลองการขับชี่รถยนต์ การส่งค่าออกให้กับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงและการรับค่ากลับเข้ามา พร้อมกับรับค่าของคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับชี่ โดยทุกครั้งที่มีการรับ-ส่งข้อมูลจะต้องมีการบันทึกค่าไว้ ลักษณะของโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม NI LabVIEW[®] จะมีความคล้ายคลึงกับรูปแบบการทดสอบผ่านช่องทาง RS232 แต่สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างคอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริง จะสร้างโปรแกรมเพื่อการทดสอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB[®] Simulink คล้ายกับการสร้างโปรแกรมใน dSPACE แต่คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้ง Intel[®] PRO/1000 GT Desktop Adapter แทน card DS1104 ซึ่งเชื่อมต่อกับช่องสื่อสารบน dSPACE การควบคุมการทำงานกระทำผ่านทางคอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่ง ที่สื่อสารผ่านทางสายสื่อสารประเภท TCP/IP ซึ่งการกระทำดังกล่าวสามารถบันทึกข้อมูลจากการจำลองแบบจำลองลงบนโปรแกรม MATLAB[®] ซึ่งทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่ทำการควบคุมได้ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีโปรแกรมอื่นใดมาใช้ในการบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับการใช้ dSPACE

2) ทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล

เนื่องจากการรับ-ส่งข้อมูลผ่านสายสื่อสารประเภท TCP ผ่านฮับนั้น ไม่ต้องทำการควบคุมการเลือกช่องทางในการรับ-ส่งข้อมูล ดังนั้นจึงมุ่งไปที่ความสามารถของชุดคำสั่งที่ใช้ในการทำงาน โดยใช้แนวคิดหลักในการทดสอบเช่นเดิม นั่นคือ ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลในระบบ จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับความเร็วในการรับ-ส่งของสายสัญญาณ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่มีการรับ-ส่งไม่เกิดการ

ตกหล่นหรือสูญหายโดยจากการทดสอบพบว่า สามารถส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล ทั้งสองโดยผ่านสายสื่อสาร TCP/UDP ได้ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลระหว่างNI CompactRIO และ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง

Sampling time (μ s)	ข้อมูลที่ส่งออกจาก NI CompactRIO	ข้อมูลที่ถูกรับโดย คอมพิวเตอร์ทำงาน เวลาจริง	ข้อมูลที่ส่งออกจาก คอมพิวเตอร์ทำงาน เวลาจริง	ข้อมูลที่ถูกรับโดย NI CompactRIO
100	Unable to response	No data	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	Unable to response
200	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 3 4 5 6 7 9 10 11 13...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12...
300	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12...

พิจารณาผลการทดสอบจากตารางที่ 3-5 พบว่า ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 100 ไมโครวินาที NI CompactRIO ไม่สามารถตอบสนองต่อการทำงาน ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 200 ไมโครวินาทีข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และNI CompactRIO อ่านได้มีการอ่านค่า บางข้อมูลสูญหาย แต่ที่เวลาการซักรับข้อมูลเป็น 300 ไมโครวินาที ข้อมูลที่มีการรับ-ส่งนั้นตรงกันทุกประการ จึงสามารถสรุปได้ว่าการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทาง TCP/UDP ระหว่างNI CompactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ได้ด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ 300 ไมโครวินาที หรือ 3333 Hz โดยคำนวณจากสมการที่ 3-33

$$sampling\ rate = \frac{1}{300 \times 10^{-6}} = 3333\ s^{-1}$$

จากผลการทดลอง พบว่าความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลหลัก มากกว่าค่าความเร็วที่ต้องการ (500 Hz) ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ช่องทางสื่อสารประเภท TCP/UDP ในงานวิจัยนี้ โดยค่าความเร็วดังกล่าว เมื่อพิจารณาสถานการณ์ในการทำงานจริง อาจช้าลงกว่าผลการทดลองเบื้องต้น เนื่องจากอุปกรณ์ประมวลผลมีมากกว่า 2 ตัว (NI CompactRIO, อุปกรณ์ประมวลผลหลัก, คอมพิวเตอร์แสดงผลกราฟิกรับ, และ NI PXI Controller) ซึ่งอาจเป็นเหตุให้ข้อมูลเกิดการขัดขวางการรับ-ส่งภายในฮับ ซึ่งจะทำให้เกิดการหน่วงเวลา (time delay)

สรุปการทำงานของระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL

ระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL มีความคาดหวังให้มีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลมีค่าอย่างน้อย 500 ครั้งต่อวินาที (500 Hz) ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ในการทำงานแบบเวลาจริงร่วมกับชิ้นส่วนจริงและมนุษย์ ในการออกแบบระบบสื่อสาร พิจารณาเลือกช่องทางสื่อสารที่มีอยู่บนอุปกรณ์ประมวลผลที่เลือกใช้ ซึ่งให้ความสำคัญกับอุปกรณ์ประมวลผลของระบบเดิม เนื่องจากต้องการคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการทำงานของระบบโดยรวม การรับ-ส่งข้อมูล เนื่องจากการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล จะเกิดขึ้นมากบริเวณอุปกรณ์ประมวลผลหลัก และ NI CompactRIO ดังนั้นจึงพิจารณาเน้นหนักไปในส่วนนี้ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง NI CompactRIO กับ dSPACE ผ่านทางช่องทางสื่อสารประเภท RS232 มีค่าเป็น 100 ครั้งต่อวินาที น้อยกว่าความเร็วคาดหวังที่จะได้รับ (500 ครั้งต่อวินาที) ดังนั้นจึงพิจารณาการรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง NI compactRIO กับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง (xPC) ผ่านทางช่องทางสื่อสารประเภท TCP/UDP พบว่าสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วเป็น 3333 ครั้งต่อวินาที มากกว่าความเร็วคาดหวังที่จะได้รับ ซึ่งค่าความเร็วดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลงคือ ความเร็วลดลง เนื่องจากการทดลองรับ-ส่งข้อมูลนี้ เป็นการทดลองระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล 2 เครื่อง แต่ในชุดทดสอบ HHIL นั้น จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประมวลผล 4 เครื่อง นั่นคือ NI CompactRIO, อุปกรณ์ประมวลผลหลัก ในที่นี้คือ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง, คอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่, และ NI PXI Controller ซึ่งจะต้องสื่อสารผ่านทางช่องทางสื่อสาร TCP/UDP โดยการจัดการการรับ-ส่งข้อมูล จะกระทำผ่านฮับ ซึ่งอาจเป็นเหตุให้เกิดการหน่วงเวลาขณะรับ-ส่งข้อมูลจากหลายทิศทางได้

บทที่ 4

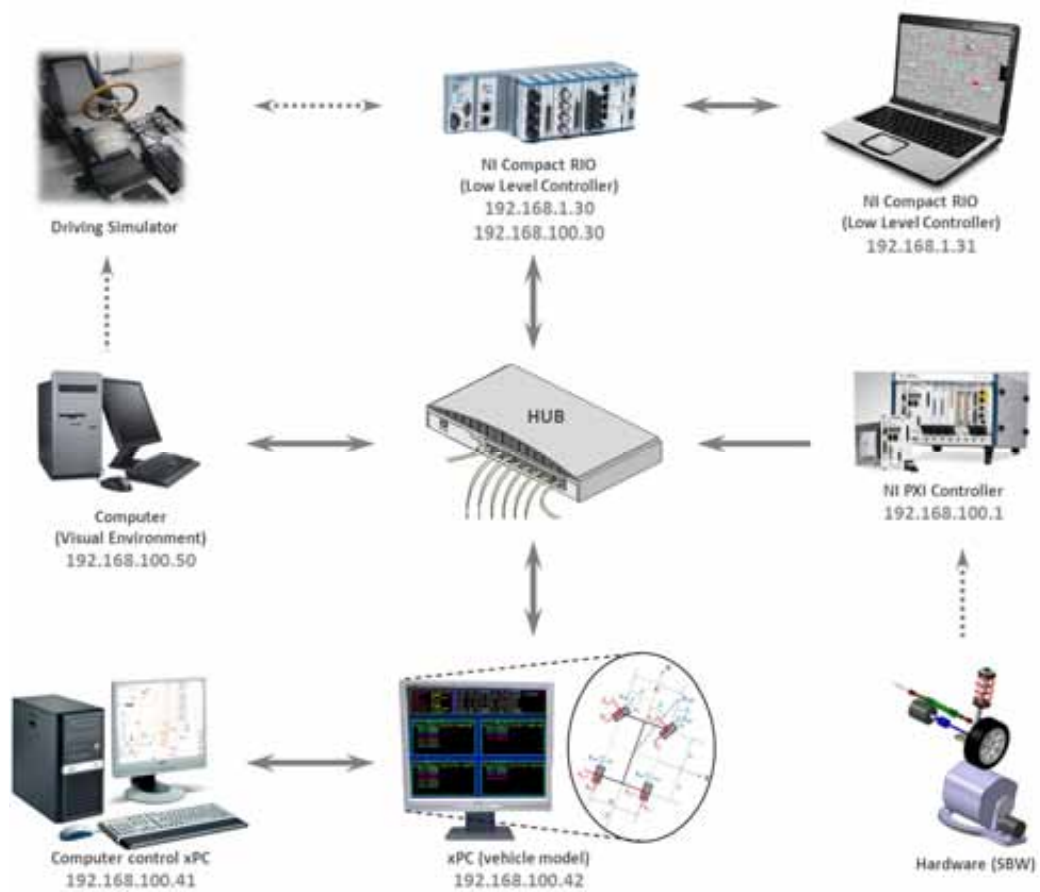
การตรวจสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL

และการประเมินระบบบังคับลิ้นด้วยไฟฟ้า

ในบทนี้จะประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การตรวจสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL แนวทางการแก้ไขระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL และการใช้ชุดทดสอบเพื่อประเมินระบบบังคับลิ้นด้วยไฟฟ้า โดยในส่วนแรก การตรวจสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL จะแสดงขั้นตอนการทดสอบโดยจะแยกทดสอบการทำงานของระบบเป็นส่วนๆก่อน จากนั้นจึงรวมระบบเข้าด้วยกัน รวมไปถึงผลที่ได้จากการทดสอบการทำงานในแต่ละส่วนของระบบ ในส่วนที่สอง จะเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาและการพัฒนาระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น และในส่วนสุดท้าย จะเสนอแนวทางการใช้ชุดทดสอบ HHIL เพื่อประเมินระบบบังคับลิ้นด้วยไฟฟ้า และการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยใช้กฎของพีตส์ซึ่งจะมุ่งเน้นในเรื่องการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยเพื่อแทนที่ความรู้สึกที่ได้จากพื้นถนน โดยรายละเอียดของเนื้อหาหลักทั้ง 3 ส่วนมีดังนี้

4.1 การตรวจสอบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL

จากการออกแบบและการทดสอบเลือกอุปกรณ์ประมวลผล และช่องทางการรับ-ส่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบ HHIL จะได้ว่าระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยรวมมีการทำงานดังภาพที่ 4-1 เส้นทึบแสดงการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางสายสื่อสาร TCP/UDP ในขณะที่เส้นประแสดงการรับส่งข้อมูลผ่านทางช่องทางการสื่อสารแบบอื่น นั่นคือ ระบบสื่อสารโดยรวมของชุดทดสอบ HHIL จะประกอบด้วยอุปกรณ์ประมวลผล 4 ตัว คือ NI compactRIO, NI PXI Controller, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชิ้นส่วนจริงและเครื่องจำลองการขับขี่รถยนต์, ตรวจวัดและสอบเทียบค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด และจำลองแบบจำลองและแสดงผลการขับขี่ ตามลำดับ ซึ่งจากที่กล่าวแล้วข้างต้นว่า NI CompactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ notebook ที่มีโปรแกรม NI Labview และคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม MATLAB Simulink ตามลำดับ อุปกรณ์ประมวลผลทั้งหมดดังกล่าวจะติดต่อกันด้วยช่องทางสื่อสารประเภท TCP ผ่านฮับซึ่งมีเลขประจำเครื่อง (IP address) โดยสรุป ดังนี้








ภาพที่ 4-1 แผนผังระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HIL โดยรวม

เลขประจำเครื่อง (IP address)

- Notebook : 192.168.1.31
- NI CompactRIO
 - Primary address : 192.168.1.30
 - Secondary address : 192.168.100.30
- คอมพิวเตอร์ควบคุมคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง : 192.168.100.41
- คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง : 192.168.100.42
- คอมพิวเตอร์แสดงผลการขับที่ : 192.168.100.50
- NI PXI Controller : 192.168.100.1

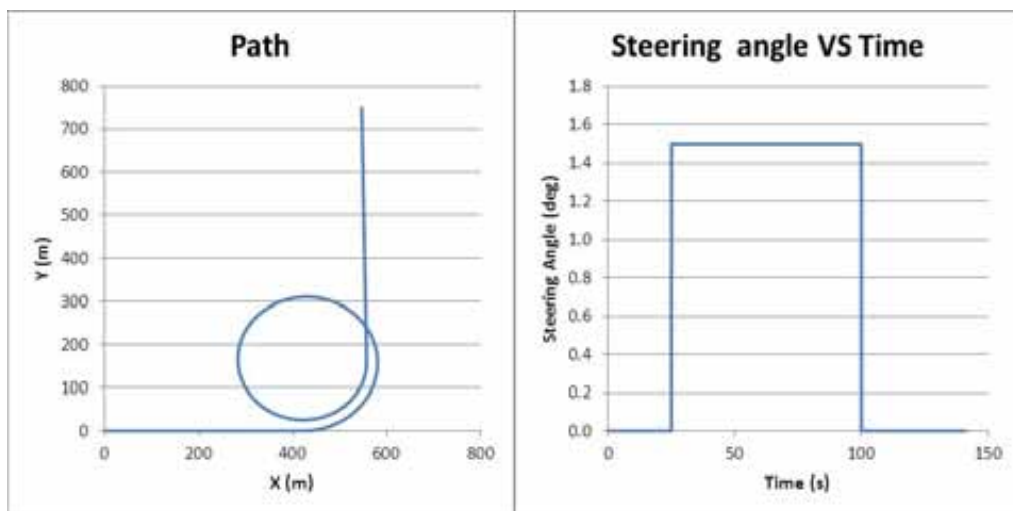
เนื่องจากอุปกรณ์ประมวลผลของชุดทดสอบ HHIL มีมากกว่า 2 เครื่อง อาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านระบบเครือข่าย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของชุดทดสอบ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณาและตรวจหาข้อผิดพลาดของระบบสื่อสารของชุดทดสอบ จึงแยกการทดสอบออกเป็นส่วนการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 4-1 การตรวจสอบการทำงานของแต่ละส่วนของระบบ จะพิจารณาจากความถูกต้องและและความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล โดยความเร็วดังกล่าวจะเป็นข้อจำกัดในการรับ-ส่งข้อมูลในการตรวจสอบระบบถัดไปในกรณีที่มีการทดสอบร่วมกับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง จะพิจารณาถึงผลการทดสอบทางพลศาสตร์ยานยนต์ที่เกี่ยวข้องในการประเมินระบบบังคับเบี่ยงด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองยานยนต์ที่ใช้ เมื่อทดสอบระบบแยกส่วนทั้งหมดแล้ว จึงรวมการทำงานของระบบเข้าด้วยกันเป็นชุดทดสอบ HHIL จากนั้นจึงตรวจสอบเพื่อหาค่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ประมวลผลร่วมกับชิ้นส่วนจริงและมนุษย์อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4-1 การแยกระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL

ลักษณะระบบสื่อสารที่ทำการตรวจสอบ	อุปกรณ์ประมวลผลที่เกี่ยวข้อง
	<p>ระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่</p>
	<p>ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง(ทำการทดสอบแล้วในหัวข้อ3.2.2.2)</p>
	<p>ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงและคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่</p>
	<p>ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และ NI PXI Controller (ชุดทดสอบ HIL-Hardware)</p>
	<p>ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, NI PXI Controllerคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง , และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ (HHIL)</p>

4.1.1 ระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์ แสดงผลการขับขี่

การทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ โดยกำหนดคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงจำลองแบบจำลองยานยนต์ ซึ่งมีสัญญาณมุมเลี้ยวจากการจำลองบนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กำหนดให้ยานยนต์มีความเร็วคงที่ จากนั้นส่งค่าแสดงตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงโลก (X, Y) และมุมมองของยานยนต์ (yaw angle) ให้กับคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ ที่ทำหน้าที่แสดงผลทางหน้าจอ ในการทดสอบ กำหนดค่าสัญญาณมุมเลี้ยวมีลักษณะ unit step ขนาด 22.5 องศาที่พวงมาลัย นั่นคือจะได้มุมเลี้ยวที่ลื้อเป็น 1.5 องศา เริ่มเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 25 ถึงวินาทีที่ 100 ซึ่งจะทำให้ยานยนต์วิ่งในเส้นทางตรงก่อนในช่วงแรก จากนั้นจึงเลี้ยวเป็นวงกลม 1 รอบ ก่อนที่จะวิ่งในเส้นทางตรงอีกครั้งในทิศทางตั้งฉากกับตอนแรก ลักษณะสัญญาณมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย และเส้นทางการวิ่งของยานยนต์ดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ลักษณะสัญญาณมุมเลี้ยวที่พวงมาลัย และเส้นทางการวิ่งของยานยนต์ที่จำลองขึ้น สำหรับทดสอบระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงและคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่

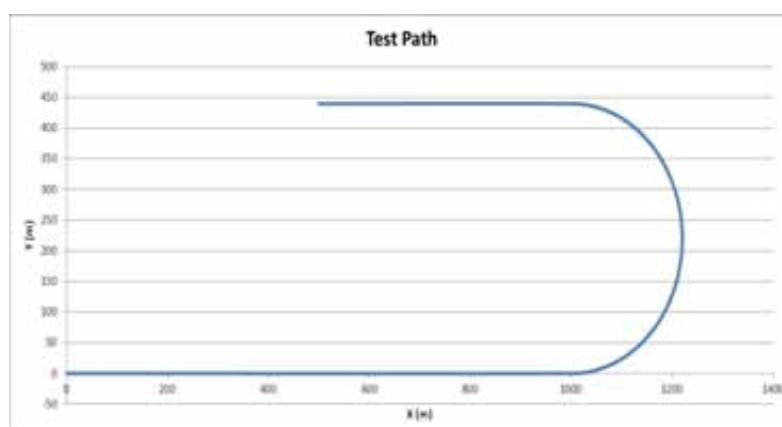
จากการทดสอบเป็นที่สังเกตได้ว่า ที่ความเร็วต่างกันในการทำงานของคอมพิวเตอร์ทำงานจริง การแสดงผลที่ได้จากการจำลองการขับขี่จะแตกต่างกันไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ที่เวลาการชั้กตัวอย่างเป็น 1 ms : หน้าจอแสดงผลกระทัดรัดบ่อยมาก หยุดนิ่งเป็นช่วงเวลาในบางครั้ง
- ที่เวลาการชั้กตัวอย่างเป็น 5 ms : หน้าจอแสดงผลกระทัดรัดบางครั้ง เมื่อทำงานเป็นเวลานาน
- ที่เวลาการชั้กตัวอย่างเป็น 10 ms : แสดงผลได้ต่อเนื่อง

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความเร็วจำกัดสำหรับการแสดงผลนั้นอยู่ที่ประมาณ 10 มิลลิวินาที หรือ 100 Hz ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านตัวประมวลผลของคอมพิวเตอร์แสดงผลการชั้บที่เอง

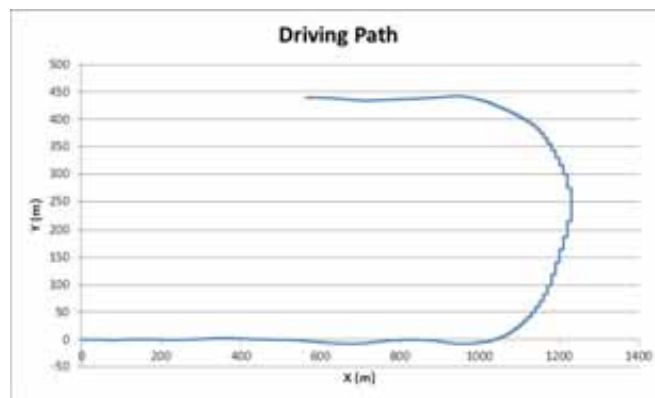
4.1.2 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงและคอมพิวเตอร์แสดงผลการชั้บที่

การทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ประมวลผล 3 เครื่อง โดยเป็นการทำงานของเครื่องจำลองการชั้บที่ ที่ควบคุมการทำงานโดย NI CompactRIO ร่วมกับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงที่มีแบบจำลองยานยนต์อยู่ โดยกำหนดให้สัญญาณมุมเลี้ยวมาจากการหมุนพวงมาลัยที่เครื่องจำลองการชั้บที่ ผู้ทดสอบจะต้องวิ่งตามเส้นทางที่เห็นบนคอมพิวเตอร์แสดงผลการชั้บที่ ซึ่งกำหนดให้เป็นทางตรง 1000 เมตร จากนั้นจึงเลี้ยวโค้งที่มีรัศมีความโค้ง 220 เมตร ครึ่งวงกลม จากนั้นจึงขับเป็นทางตรงต่ออีก 500 เมตร มีการส่งค่าแสดงตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงโลก (X, Y) และมุมมองของยานยนต์ (yaw angle) ให้กับคอมพิวเตอร์แสดงผลการชั้บที่ขณะทำการทดสอบและในขณะที่ชั้บที่จะมีการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยแทนความรู้สึกจากพื้นถนน เมื่อกำหนดให้ตัวแปรปรับปรุงแบบจำลองแรงบิด $\beta=1.5$ ลักษณะเส้นทางการวิ่งของยานยนต์ที่กำหนดดังแสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ลักษณะเส้นทางการวิ่งของยานยนต์สำหรับทดสอบระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง

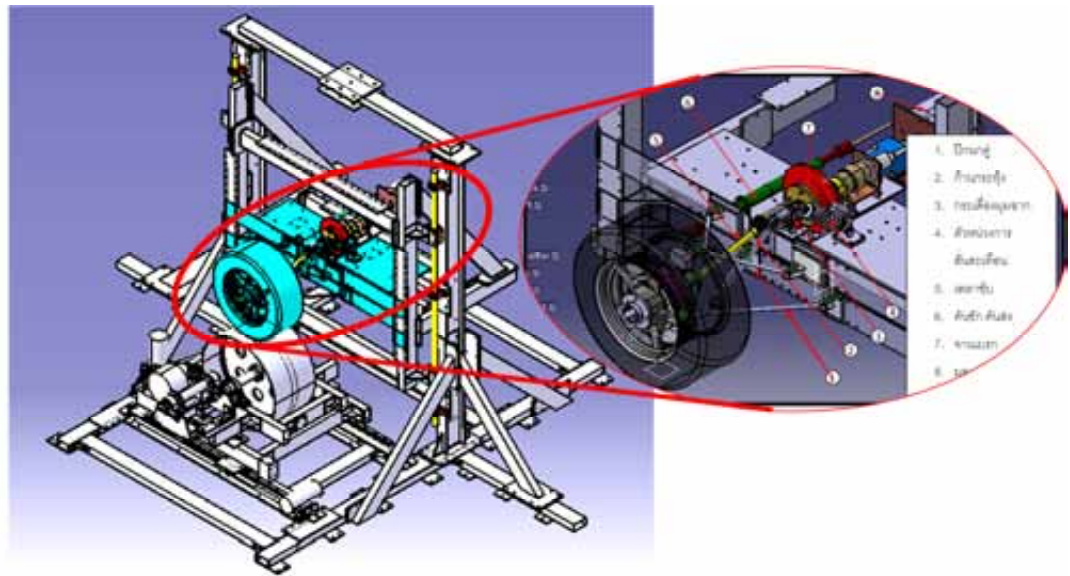
ทำการทดสอบที่ความเร็ว 10, 40, 50 มิลลิวินาที ตามลำดับ โดยพบว่าที่ความเร็ว 10 มิลลิวินาที ข้อมูลที่เก็บบันทึกมาไม่สามารถนำมาแสดงผลในรูปแบบเส้นทางการวิ่งได้ เนื่องจากข้อมูลมีการสูญหายเป็นจำนวนมาก และข้อมูลบางส่วนถูกแทนที่ด้วยเลขศูนย์เมื่อไม่มีการรับข้อมูลเข้ามา ซึ่งอาจเกิดจากการระบบเครือข่ายขัดข้องขณะทำงาน หรือข้อมูลที่รับ-ส่งมีจำนวนมากเกินกว่าที่ขนาดพื้นที่ร่วมของข้อมูล (Buffer) นอกจากนี้การแสดงผลผ่านทางหน้าจอยังมีการกระตุกและหยุดนิ่งในบางครั้ง ซึ่งทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถตอบสนองต่อการขับขี่ได้ ดังนั้นจึงพิจารณาการทำงานของระบบที่ความเร็ว 40 และ 50 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ครบถ้วนลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการขับขี่ผ่านเครื่องจำลองการขับขี่ที่แสดงในภาพที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องกับการแสดงผลการขับขี่ผ่านทางคอมพิวเตอร์ จากผลการขับขี่พบว่ามีความผิดพลาดในขับขี่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแรงบิดที่พวงมาลัย โดยการประเมินระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้าจะกระทำในลำดับต่อไป จากการทดสอบระบบสื่อสารนี้สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วจำกัดสำหรับการทำงานรวมกันของ อุปกรณ์ประมวลผล NI compactRIO, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ อยู่ที่ประมาณ 40 มิลลิวินาที หรือ 25 Hz



ภาพที่ 4-4 ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการขับขี่ผ่านเครื่องจำลองการขับขี่

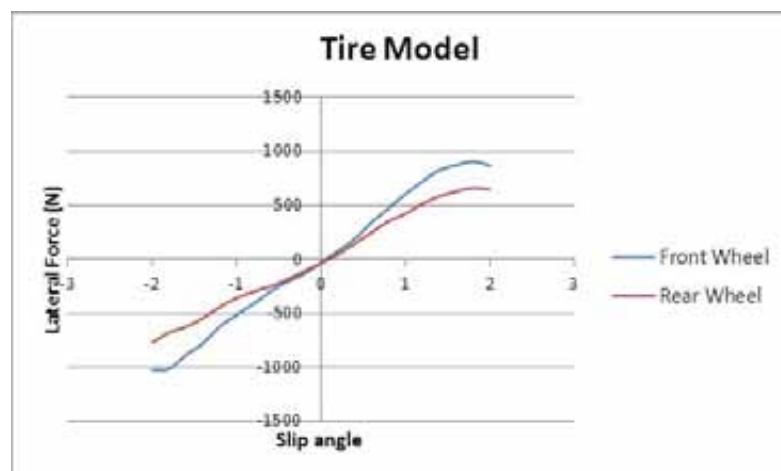
4.1.3 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และ NI PXI Controller (ชุดทดสอบ HIL-Hardware)

การทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของชุดทดสอบ HIL-Hardware โดยจะทดสอบเพื่อหาแบบจำลองของยาง (Tire model) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำด้านข้างกับมุมลื่นไถลของล้อ ชิ้นส่วนจริงที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยยาง ระบบบังคับเลี้ยว และระบบรองรับประเภท A-arm หรือ Wishbone ซึ่งถูกปรับปรุงเพื่อใช้ในการทดสอบรถ student formula ซึ่งมีลักษณะการจัดวางชุดทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ชุดทดสอบ HIL-Hardware ที่ประกอบด้วยยาง ระบบบังคับเดี่ยว และระบบรองรับ

การทดสอบจะควบคุมมุมลื่นไถลของล้อให้คงที่ กำหนดให้ล้อยึดถูกล้อเป็นล้อหน้าและล้อหลังตามลำดับ จากนั้นตรวจวัดค่าแรงด้านข้างที่กระทำกับล้อ โดยจะเปลี่ยนมุมลื่นไถลตามช่วงการใช้งาน นั่นคือ -2 องศา ถึง 2 องศา การเปลี่ยนแปลงมุมลื่นไถลครั้งละ 0.2 องศา โดยใช้ค่าความเร็วจำกัดเดิมของชุดทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 NI compactRIO ทำงานที่ 2 มิลลิวินาที หรือ 500 Hz และ NI PXI controller ส่งค่าแรงที่ตรวจวัดได้ในทุกๆ 2 มิลลิวินาที (500 ค่า/วินาที) และการเก็บข้อมูลบนเครื่อง NI PXI Controller จะทำงานที่ความเร็ว 100 มิลลิวินาที (100 รอบ/วินาที) ซึ่งเป็นการทำงานแบบ multi-rate ที่มีเสถียรภาพผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองของยาง (Tire model) โดยใช้ชุดทดสอบ HIL-Hardware

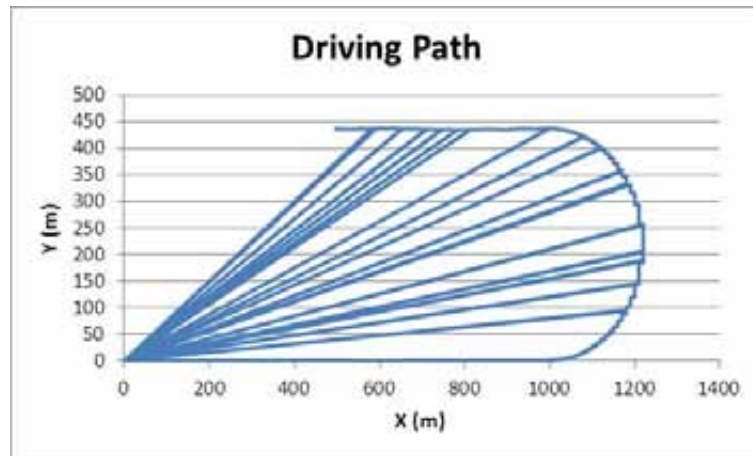
จากผลการทดลอง พบว่าสามารถหาแบบจำลองยางที่มีแนวโน้มสอดคล้องกับแบบจำลองยางทั่วไปได้ โดยใช้ชุดทดสอบ HIL-Hardware ที่ทำงานด้วยความเร็วการทำงานเท่าเดิม นั่นคือ 2 มิลลิวินาที ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบไม่มีผลต่อการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL แต่ประการใด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความเร็วจำกัดสำหรับการทำงานรวมกันของ อุปกรณ์ประมวลผล NI compactRIO และ NI PXI Controller คือ 2 มิลลิวินาที หรือ 500 Hz

4.1.4 ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, NI PXI Controller คอมพิวเตอร์ , ทำงานเวลาจริงและคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ (HHIL)

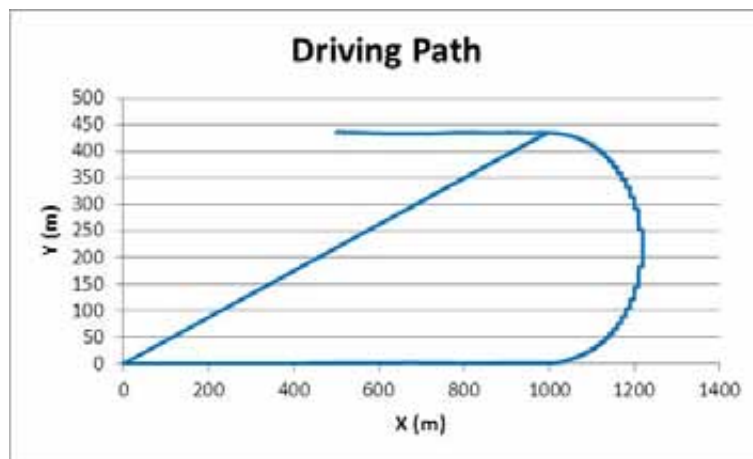
จากการทดสอบระบบแบบแยกส่วนข้างต้น พบว่าความเร็วจำกัดในการทำงานของแต่ละระบบแตกต่างกัน โดยสรุปได้ดังนี้

- ระบบสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่
ความเร็วจำกัดในการทำงานเป็น 10 มิลลิวินาที หรือ 100 Hz
- ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง
ความเร็วจำกัดในการทำงานเป็น 0.3 มิลลิวินาที หรือ 3333 Hz
- ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงและคอมพิวเตอร์
แสดงผลการขับขี่
ความเร็วจำกัดในการทำงานเป็น 40 มิลลิวินาที หรือ 25 Hz
- ระบบสื่อสารระหว่าง NI compactRIO และ NI PXI Controller (HIL-Hardware)
ความเร็วจำกัดในการทำงานเป็น 2 มิลลิวินาที หรือ 500 Hz

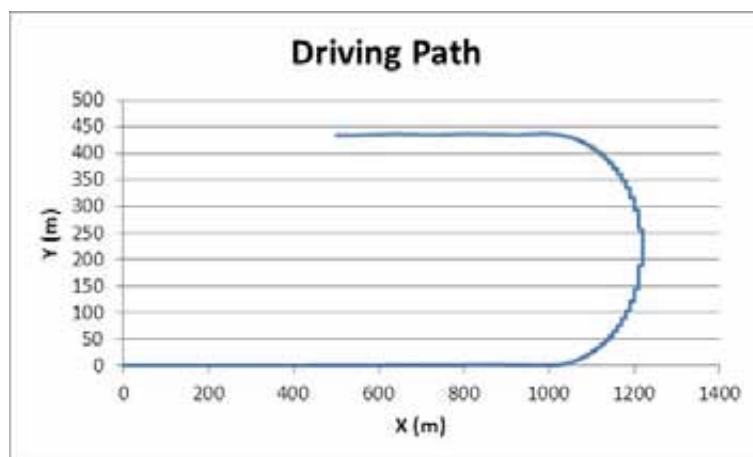
นั่นคือ ความเร็วในการทดสอบชุดทดสอบ HHIL โดยรวมเบื้องต้นคือ 40 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป ในการทดสอบครั้งนี้ เลือกทดสอบที่ความเร็วของชุดทดสอบ 30, 40, และ 50 มิลลิวินาที กำหนดให้รูปแบบการขับทดสอบ เป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้อ 4.1.2 เพิ่มในส่วนของการรับและบันทึกค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงบริเวณยาง (ชิ้นส่วนจริง) ซึ่งพัฒนาเพื่อรองรับการนำค่าแรงดังกล่าวไปใช้อ้างอิงในการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย แทนความรู้สึกที่ได้จากพื้นถนนสำหรับงานวิจัยในอนาคต อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้แบบจำลอง Dahl ดังที่กล่าวในเบื้องต้นในการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย กำหนดให้ตัวแปรปรับระบบจำลองแรงบิด $\beta=1.5$ ที่ความเร็วของชุดทดสอบ 30, 40, และ 50 มิลลิวินาที (33.3, 25, และ 20 Hz) โดยกำหนดให้ NI CompactRIO บันทึกค่าที่ความเร็วดังกล่าว ในขณะที่ NI PXI controller บันทึกค่า 5 ครั้งต่อวินาที (5 Hz) รายละเอียดการบันทึกค่าดังแสดงในภาคผนวก ค จะได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-7, 4-8 และ 4-9 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-7 ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 30มิลลิวินาที (33.3Hz)

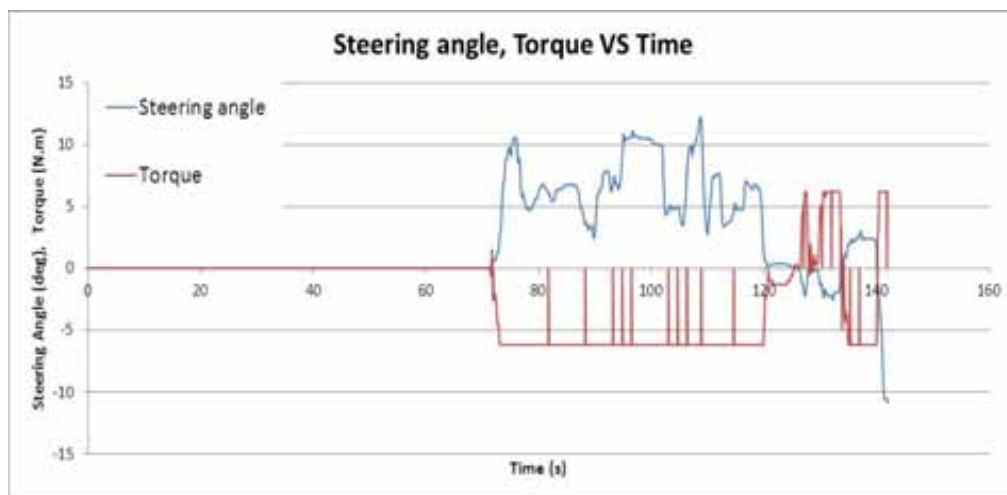


ภาพที่ 4-8 ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 40 มิลลิวินาที (25 Hz)

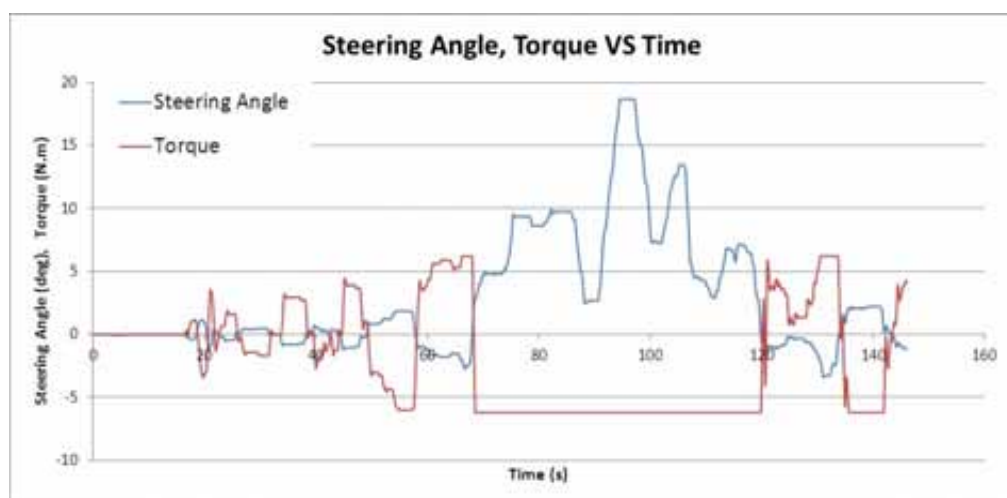


ภาพที่ 4-9 ลักษณะเส้นทางการวิ่งที่ได้จากการทดสอบHHIL ที่ความเร็ว 50 มิลลิวินาที (20 Hz)

จะสังเกตเห็นเส้นตรงวิ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลาง (0,0) ในภาพที่ 4-7 และ 4-8 ซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดในการรับ-ส่งข้อมูลภายในเครือข่ายระบบสื่อสาร เมื่อไม่สามารถรับค่าเข้ามาได้ ค่าที่แสดงและบันทึกในเวลานั้นๆ จะแสดงค่าศูนย์ ซึ่งขณะขับที่จริง ผู้ขับจะรับรู้ถึงความผิดพลาดจากหน้าจอแสดงลักษณะการขับชั้ และแรงบิดที่พวงมาลัยจะขาดหายเป็นช่วงๆ โดยจะสังเกตค่าของแรงบิดที่ผิดพลาดได้จากการเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 4-10 และ 4-11 ซึ่งผลการทดสอบที่ความเร็วของชุดทดสอบ 30 มิลลิวินาที และ 50 มิลลิวินาที ตามลำดับ ค่ามุมเลี้ยวที่รับมาจากพวงมาลัยของเครื่องจำลองการขับชั้ สามารถบันทึกได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ค่าแรงบิดที่พวงมาลัยที่มาจากแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง มีค่าบางส่วนสูญหายไป ทำให้เห็นเป็นเส้นแนวตั้งตลอดช่วงการทำงาน



ภาพที่ 4-10 ผลการทดสอบระบบ HHIL ที่ความเร็ว 30 มิลลิวินาที



ภาพที่ 4-11 ผลการทดสอบระบบ HHIL ที่ความเร็ว 50 มิลลิวินาที

พิจารณาผลการทดสอบที่ความเร็วชุดทดสอบ 40 มิลลิวินาที พบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การพัฒนาชุดทดสอบ HHIL นั้น มุ่งหวังที่จะใช้ชุดทดสอบดังกล่าวในการพัฒนาระบบทางยานยนต์ต่อไปในอนาคต จึงไม่สามารถยอมรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการทดสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL จึงสรุปได้ว่า ความเร็วจำกัดสำหรับการทำงานของชุดทดสอบ อยู่ที่ 50 มิลลิวินาที หรือ 20 Hz

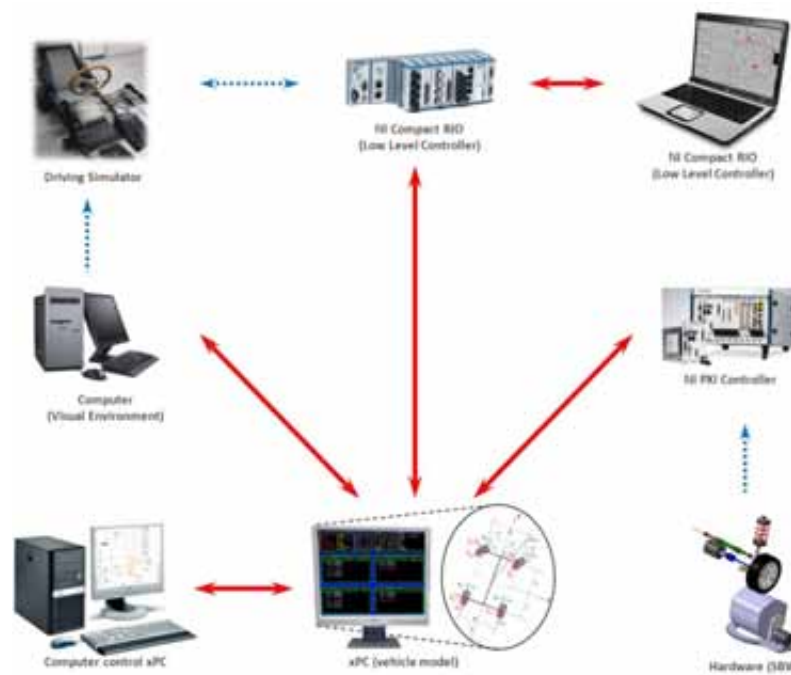
จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า ความเร็วจำกัดสำหรับการทำงานของชุดทดสอบมีค่าไม่เหมาะสมในการทำงานร่วมกับชิ้นส่วนจริง เนื่องจากการจำลองลักษณะทางพลศาสตร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นค่าประมาณที่นำไปใช้ควบคุมการทำงานของชิ้นส่วนจริง ดังนั้นชุดทดสอบ HHIL ควรทำงานได้ที่ความเร็วอย่างน้อย 500 Hz ขึ้นไป ซึ่งพบว่าสาเหตุของความเร็วการทำงานที่จำกัดอยู่ที่ 20 Hz นั้น เกิดจากการรับ-ส่งข้อมูลผ่านฮับของอุปกรณ์ประมวลผลมากกว่า 2 ตัว ซึ่งมีสาเหตุจากความต้องการด้านเสถียรภาพของระบบ ที่มาจากการพัฒนาชุดทดสอบ HHIL จากชุดทดสอบ HIL-Hardware และเครื่องจำลองการขับขี่ที่มีอยู่เดิม จึงยังคงหน้าที่ของอุปกรณ์ประมวลผลเดิมไว้

4.2 แนวทางการแก้ไขระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL

จากการออกแบบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL พบว่ามีการใช้อุปกรณ์ประมวลผลหลายเครื่อง โดยเป็นการนำอุปกรณ์มาเชื่อมต่อกันผ่านทางสายสื่อสาร แต่ไม่ได้พิจารณาการควบคุมการทำงานในระดับการประมวลผลของแต่ละเครื่อง นั่นคืออุปกรณ์ประมวลผลแต่ละเครื่อง จะทำงานตามสัญญาณนาฬิกา (clock) ของตนเองที่มีความแตกต่างกันไปในแต่ละเครื่อง ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการใช้อุปกรณ์ประมวลผลหลายเครื่องในเวลาเดียวกัน เนื่องจากจะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลระหว่างการสื่อสาร เป็นเหตุให้มีการสูญหายของข้อมูลหรือเกิดการหน่วงเวลาของข้อมูลขณะทำงาน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งตัวโปรแกรมของระบบสื่อสารให้สามารถทำงานร่วมกันได้ในความเร็วการทำงานเดียวกัน ที่มีข้อจำกัดอยู่ที่ตัวอุปกรณ์ประมวลผลเองและโปรแกรมที่ใช้ในการทำงาน

จากผลการทดสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL พบว่าความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางสายสื่อสาร TCP มีการทำงานที่ 20 Hz ลดลงมาจากการทดสอบการสื่อสารเบื้องต้น (3333 Hz) ประมาณ 160 เท่า เนื่องจากมีการชนกันของข้อมูลระหว่างการทำงานที่ควบคุมการรับ-ส่งโดยอัตโนมัติผ่านทางฮับ ซึ่งความเร็วในการทำงานดังกล่าวช้ามากเกินไปอาจเป็นผลให้ไม่สามารถใช้ระบบสื่อสารดังกล่าวในการทำงานเวลาจริงร่วมกับชิ้นส่วนจริงได้ (ควรมีความเร็วในการทำงาน 500 Hz ขึ้นไป) การแก้ไขปัญหาดังกล่าว สามารถทำได้โดยการออกแบบระบบสื่อสาร

ภายในชุดทดสอบให้มีการรับ-ส่งข้อมูลกันโดยตรงสำหรับบริเวณที่ต้องมีความเร็วในการทำงานสูง เช่น บริเวณที่มีการทำงานร่วมกับมนุษย์และชิ้นส่วนจริง แต่ในส่วนอื่นๆให้สามารถส่งผ่านฮับได้ โดยแนวทางการแก้ไขดังกล่าว นำไปสู่การพิจารณาเลือกใช้ระบบสื่อสารแบบหลายเครือข่าย (network) ซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริงที่มีการสื่อสาร NIC มากกว่าหนึ่งการ์ด ดังแสดงในภาพที่ 4-12 การใช้งานระบบสื่อสารรูปแบบนี้จึงต้องตั้งค่า Subnet mask ที่ต่างกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-12 ระบบสื่อสารแบบหลายเครือข่าย

การเลือกใช้คอมพิวเตอร์เวลาจริงที่มีการสื่อสารมากกว่าหนึ่งการ์ดจะทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลอื่นได้โดยตรง ซึ่งจะตัดปัญหาการชนกันของข้อมูลระหว่างการทำงานภายในโดยฮับได้ อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาในด้านสัญญาณนาฬิกาที่มาจากอุปกรณ์ประมวลผลแต่ละเครื่องอยู่ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะต้องทำการปรับแต่งโปรแกรมที่ใช้ในการทำงาน โดยกำหนดลำดับการรับ-ส่งข้อมูลและเวลาที่ใช้ให้มีความแน่นอนและสอดคล้องกันระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลแต่ละเครื่อง เพื่อให้ชุดทำยชุดทดสอบ HHIL สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์และชิ้นส่วนจริงได้ นั่นคือ ความเร็วในการสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL โดยรวมอยู่ที่ 500 Hz หรือมากกว่า

อย่างไรก็ตาม แนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา เนื่องจากการใช้คอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริงที่มีการสื่อสารมากกว่าหนึ่งการ์ด เป็นเทคโนโลยีใหม่ของ

โปรแกรม MATLAB® Simulink ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในปี 2011 หรือปี พ.ศ. 2554 ซึ่งในปัจจุบัน (ปี 2012 หรือปี พ.ศ. 2555) ยังมีปัญหาในการใช้งานอยู่มาก ทั้งลักษณะและชนิดของการ์ดสื่อสารที่ต้องมีความเข้ากันได้กับรุ่นของโปรแกรมที่ใช้งาน และการพัฒนาโปรแกรมที่ยังเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นการแก้ไขปัญหาระบบสื่อสารด้วยแนวทางข้างต้น จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการพัฒนาอีกระยะหนึ่ง

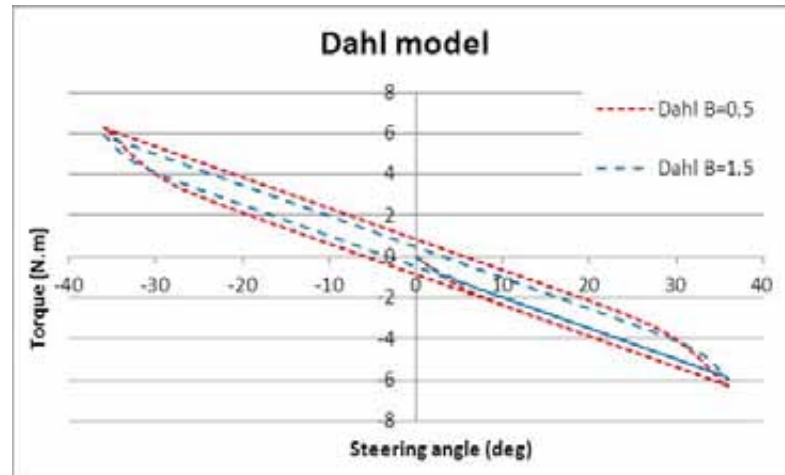
แนวทางการแก้ไขปัญหาก็อีกวิธีหนึ่งคือ ลดจำนวนอุปกรณ์ประมวลผลลง ด้วยการเพิ่มหน้าที่การทำงานให้อุปกรณ์ประมวลผลบางเครื่อง ซึ่งจะทำให้ทั้งปัญหาด้านสัญญาณพิกษาของอุปกรณ์ประมวลผล และการชนกันของข้อมูลระหว่างการรับ-ส่งของข้อมูลหมดไป แนวทางการแก้ไขปัญหาวีธีนี้ จำเป็นจะต้องออกแบบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL อย่างระมัดระวัง เพราะหน้าที่การทำงานจะต้องสอดคล้องกับคุณสมบัติของอุปกรณ์ประมวลผลนั้นๆ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในด้านช่องสัญญาณแบบอื่นๆที่มีการใช้เป็นแบบเฉพาะตัว เช่น การรับสัญญาณค่าแรงและแรงบิดจากเซ็นเซอร์จริง เป็นต้น ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงโปรแกรมที่ใช้ทดสอบให้มีความสอดคล้องด้วย

4.3 การใช้ชุดทดสอบเพื่อประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้า

แม้ว่าชุดทดสอบ HHIL มีการสื่อสารที่จำกัดความเร็วในการทำงานอยู่ที่ 20 Hz แต่สำหรับการทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้านี้ ค่าแรงที่เกิดจากเซ็นเซอร์จริง จะถูกนำมาเก็บบันทึกไว้เพื่อแสดงความสามารถของระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL เท่านั้น ซึ่งออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานของชุดทดสอบ HHIL ในอนาคต สำหรับการทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ พิจารณาเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองแรงบิดที่พวงมาลัยที่มีอัตราขยายแตกต่างกันใช้แนวคิดการวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ ในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่แสดงถึงความยากง่ายจากการขับขี่ จากนั้นจึงประยุกต์ใช้กฎสแตียริง เพื่อดูลักษณะแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยากง่ายในการขับขี่กับค่าความผิดพลาดที่ขึ้นขณะขับขี่

งานวิจัยนี้นำเสนอประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้าด้านแรงบิดที่พวงมาลัย ด้วยชุดทดสอบ HHIL ที่พัฒนาขึ้น โดยรูปแบบของแบบจำลองแรงบิดที่ใช้ในการสร้างแรงบิดจะเปลี่ยนไปตามตัวแปรปรับปรุงแบบจำลองแรงบิด Dahl (β) ซึ่งมีค่า 0.5 และ 1.5 ตามลำดับ โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4-13 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าอัตราขยายที่ไม่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมเลี้ยวเกิดการสั่น หรือไม่เสถียรขณะทำการทดสอบการขับขี่ จากนั้น จึงจะนำ

ผลที่ได้จากการขับขี่มาใช้ในการวิเคราะห์ความยากง่ายและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ที่ใช้แบบจำลองแรงบิดที่มีรูปแบบต่างกัน



ภาพที่ 4-13 ลักษณะแบบจำลอง Dahl เมื่อ β ซึ่งมีค่า 0.5 และ 1.5 ตามลำดับ

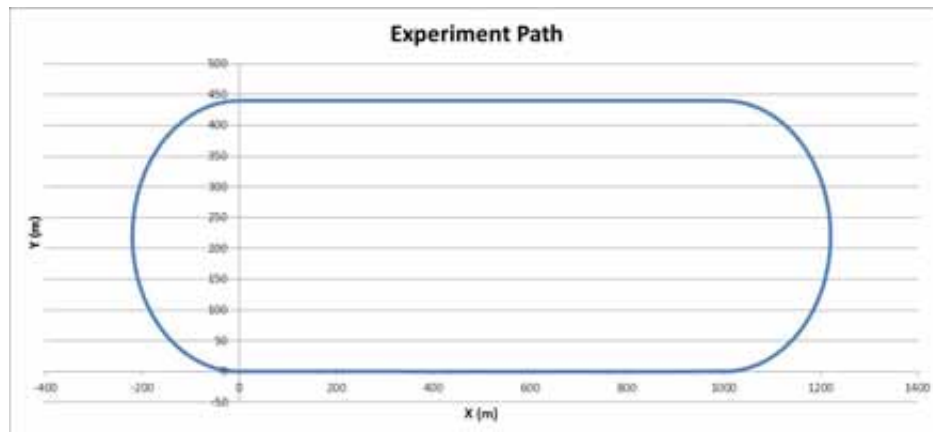
เนื่องจากการใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl สามารถเลือกใช้อัตราขยายได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการพิจารณาแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ประยุกต์จากกฎสตีเวริง ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองแรงบิดในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งใช้อัตราขยายแรงบิด 4 ค่ามาทดสอบเพิ่มเติม โดยใช้แนวคิดการวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ ในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่แสดงถึงความยากง่ายจากการขับขี่ จากนั้นจึงประยุกต์ใช้กฎสตีเวริง เพื่อดูลักษณะแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยากง่ายในการขับขี่กับค่าความผิดพลาดที่ขึ้นขณะขับขี่ ในลำดับต่อไป

4.3.1 การทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl

4.3.1.1 แนวทางการทดสอบ

ผู้ทำการทดสอบ จะต้องขับขี่ผ่านทางเครื่องจำลองการขับขี่ ซึ่งทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงที่มีแบบจำลองยานยนต์อยู่ โดยกำหนดให้สัญญาณมุมเลี้ยวมาจากการหมุนพวงมาลัยที่เครื่องจำลองการขับขี่ ผู้ทดสอบจะต้องวิ่งตามเส้นทางที่เห็นบนคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับขี่ ซึ่งกำหนดให้เป็นทางตรง 1000 เมตรจากนั้น จึงเลี้ยวโค้งที่มีรัศมีความโค้ง 220 เมตรครึ่งวงกลม จากนั้นจึงขับเป็นทางตรงต่ออีก 1000 เมตร และเลี้ยวโค้งที่มีรัศมีความโค้ง 220 เมตรครึ่งวงกลม คิดเป็น 1 รอบการวิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4-14 ผู้ทดสอบจะต้องขับตามทางเส้นทางดังกล่าวจำนวน 3 รอบ และ 7 รอบต่อ 1 ครั้งการทดสอบ ในขณะที่ขับขี่จะมีการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยแทนความรู้สึกจากพื้นถนน เมื่อกำหนดให้ตัวแปรปรับปรุงแบบจำลองแรงบิด $\beta=0.5$

และ 1.5 ในแต่ละครั้งการทดสอบ ขณะทำการทดสอบ ผู้ทดสอบจะต้องไม่ทราบว่าเป็นแบบจำลอง แรงบิดมีรูปแบบใด

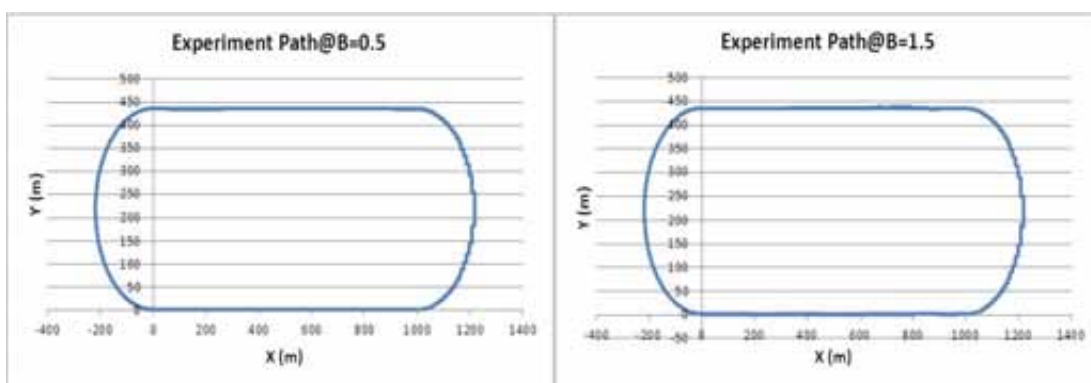


ภาพที่ 4-14 ลักษณะเส้นทางกริ่งที่ใช้ทดสอบระบบบังคับความเร็วด้วยไฟฟ้า

4.3.1.2 ผลที่ได้จากการใช้ชุดทดสอบ HHIL

1) ทดสอบขับตามทางเส้นทางจำนวน 3 รอบต่อ 1 ครั้งการทดสอบ

เนื่องจากแรงบิดที่พวงมาลัย จะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อเกิดการบังคับเลี้ยว ดังนั้นจึงพิจารณาผลเฉพาะในช่วงของการเลี้ยวซึ่งการขับชี้ทดสอบ 1 ครั้ง จะได้ผลการทดสอบการเลี้ยว 6 ครั้ง โดยค่าความผิดพลาดจะพิจารณาจากการออกนอกเส้นทางที่กำหนด โดยลักษณะการขับชี้จากผลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ผลการทดสอบเมื่อใช้แบบจำลอง Dahl

ที่ตัวแปร β ซึ่งมีค่า 0.5 (ซ้าย) และ 1.5 (ขวา)

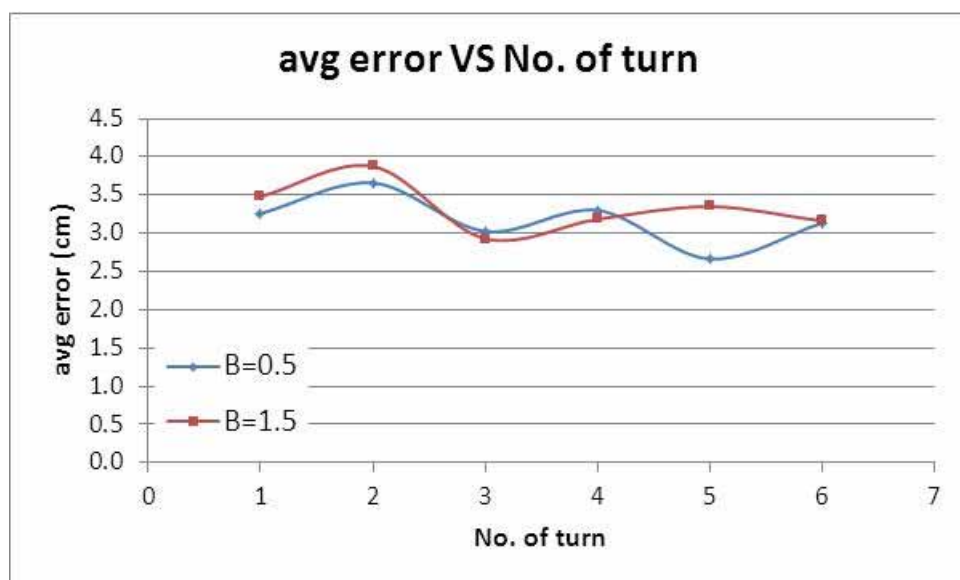
จากการทดสอบหาค่าความผิดพลาด จากการเลี้ยวโค้ง 6 ครั้ง รายละเอียดการคำนวณค่าความผิดพลาดดังแสดงในภาคผนวก ง จะพบว่าแต่ละโค้งมีความผิดพลาดเฉลี่ยในการบังคับเลี้ยว ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวเมื่อใช้ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5

เลี้ยวโค้งครั้งที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)	
	Dahl model@ $\beta=0.5$	Dahl model@ $\beta=1.5$
1	3.261	3.481
2	3.659	3.875
3	3.026	2.930
4	3.299	3.184
5	2.666	3.349
6	3.135	3.161

จากผลการทดสอบที่ได้ พบว่าขนาดของค่าความผิดพลาดในการขับขีเมื่อใช้แบบจำลองแรงบิดที่ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 โดยคร่าว่มีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแบบจำลองแรงบิดที่ใช้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าว อาจเป็นค่าความผิดพลาดที่อยู่ในช่วงที่ 1 การเรียนรู้ของผู้ขับขี ซึ่งมีค่าไม่แน่นอน

จากตารางที่ 4-2 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่ทดสอบการขับขีตามแนวคิดในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี ดังแสดงในภาพที่ 4-16

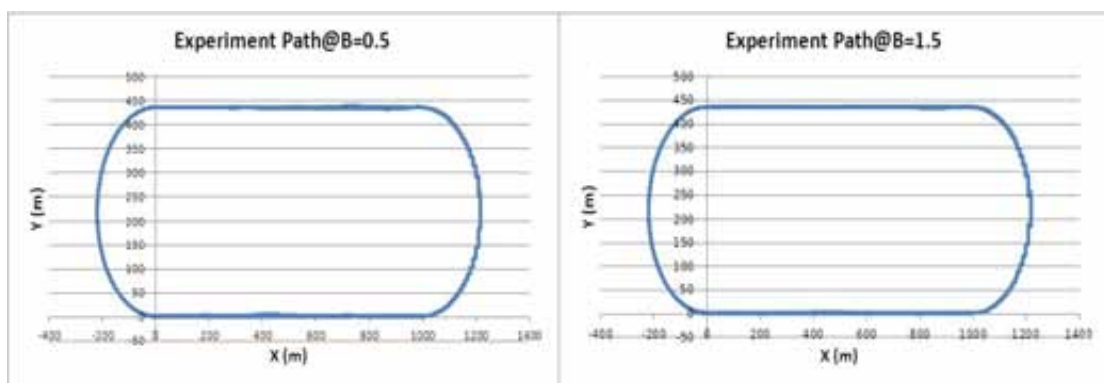


ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขี

จะสังเกตได้ว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้น มีลักษณะคล้ายกันระหว่างการขับซีทีที่ใช้แบบจำลองแรงบิดที่มีตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 แต่เมื่อพิจารณาที่รอบที่ 4 เป็นต้นไป จะพบว่า ค่าความผิดพลาดมีการขัดแย้งกัน และยังมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่อไป ซึ่งอาจสามารถพิจารณาช่วงดังกล่าว เป็นช่วงที่หนึ่ง แสดงถึงช่วงการเรียนรู้ของผู้ขับซีที ในส่วนของความยากง่ายในการขับซีทีและความล้า นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากจำนวนรอบที่ขับซีทีน้อยเกินไป

2) ทดสอบขับตามทางเส้นทางจำนวน 7 รอบต่อ 1 ครั้งการทดสอบ

พิจารณาผลเฉพาะในช่วงของการเลี้ยวเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า จะได้ผลการทดสอบจากการเลี้ยว 14 ครั้ง โดยลักษณะการขับซีทีจากผลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-17 ผลการทดสอบเมื่อใช้แบบจำลอง Dahl ที่ตัวแปร β ซึ่งมีค่า 0.5 (ซ้าย) และ 1.5 (ขวา) (2)

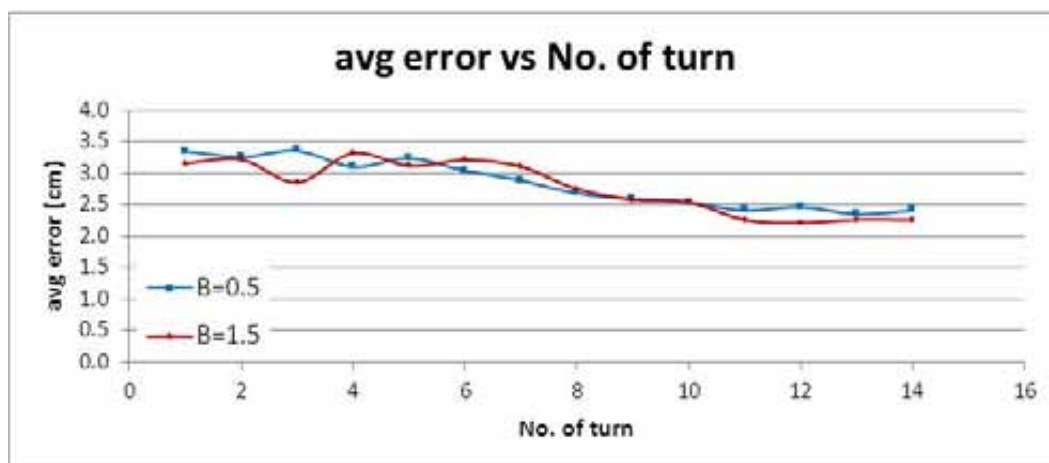
จากการทดสอบหาค่าความผิดพลาด จากการเลี้ยวโค้ง 14 ครั้ง จะพบว่าแต่ละโค้งมีความผิดพลาดเฉลี่ยในการบังคับเลี้ยวดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่าความผิดพลาดจากการบังคับด้วยเมื่อใช้ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 (2)

เลี้ยวโค้งครั้งที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)	
	Dahl model@ $\beta=0.5$	Dahl model@ $\beta=1.5$
1	3.35	3.16
2	3.26	3.21
3	3.36	2.85
4	3.10	3.32
5	3.24	3.11
6	3.04	3.21
7	2.89	3.11
8	2.68	2.75
9	2.59	2.58
10	2.53	2.54
11	2.41	2.26
12	2.47	2.22
13	2.35	2.26
14	2.41	2.26

จากผลการทดสอบที่ได้ พบว่าขนาดของค่าความผิดพลาดในการขับชี้เมื่อใช้แบบจำลองแรงบิดที่ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 โดยคร่าวมีขนาดใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า แต่ในช่วงการขับชี้รอบที่ 8 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะวิ่งเข้าสู่ค่าหนึ่งๆ ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าว อาจเป็นค่าความผิดพลาดที่อยู่ในช่วงที่ 2 ที่แสดงความยากง่ายในการขับชี้ อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบจากการใช้แบบจำลองแรงบิดที่ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากจนไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าที่ค่าอัตราขยายดังกล่าว ก่อให้เกิดความยากง่ายแตกต่างกันอย่างไร ดังนั้นงานวิจัยในอนาคต อาจพิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์อื่นในการสร้างแบบจำลองแรงบิดที่มีความแตกต่างกันมากขึ้น เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสรุปได้อย่างชัดเจน

จากตารางที่ 4-3 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับจำนวนครั้งที่ทดสอบการขับเคลื่อนตามแนวคิดในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล่าช้าที่เกิดขึ้นจากการขับเคลื่อน ดังแสดงในภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับเคลื่อน

จะสังเกตได้ว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้น มีการขัดแย้งกันบ้างระหว่างการขับเคลื่อนที่ใช้แบบจำลองแรงบิดที่มีตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 แต่เมื่อพิจารณาที่รอบที่ 10 เป็นต้นไป จะพบว่า ค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งอาจสามารถพิจารณาช่วงที่เกิดความขัดแย้งกัน เป็นช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นการเรียนรู้ของผู้ขับเคลื่อน และพิจารณาช่วงที่ค่าความผิดพลาดเข้าสู่ค่าคงที่เป็นช่วงเวลาที่สอง ซึ่งแสดงถึงความยากง่ายในการขับเคลื่อนได้จากภาพที่ 4-18 จะพบว่า

- เมื่อตัวแปร β เป็น 0.5 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดคือ 2.41
- เมื่อตัวแปร β เป็น 1.5 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดคือ 2.25

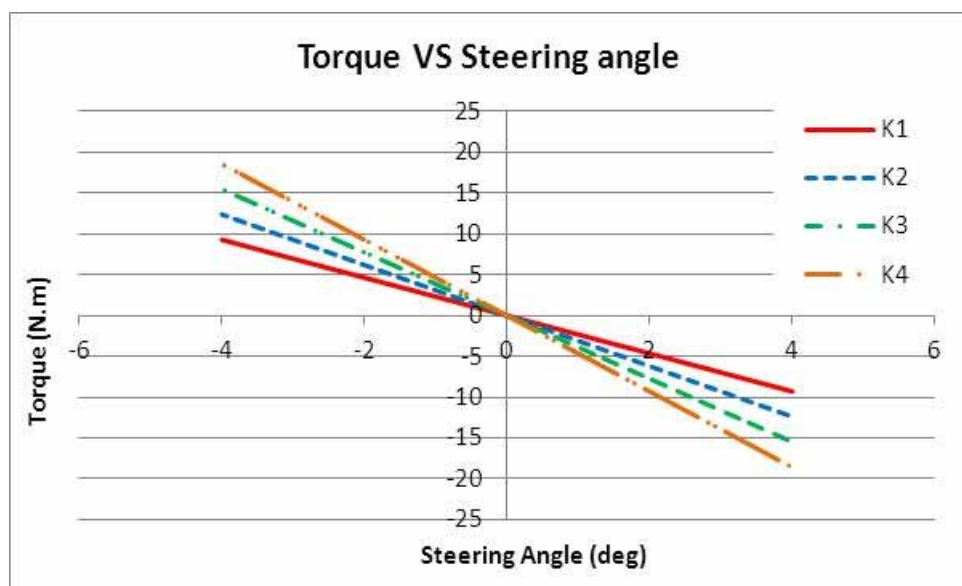
ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดคือค่าที่แสดงถึงความยากง่ายในการขับเคลื่อน โดยพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยการขับเคลื่อนเมื่อแบบจำลองแรงบิดมีตัวแปร β เป็น 1.5 ขับง่ายกว่าเมื่อมีตัวแปร β เป็น 0.5 เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเชิงตัวเลขที่แสดงในตารางที่ 4-3 แต่มีความชัดเจนกว่า

4.3.2 การทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองแรงบิดเชิงเส้น

4.3.2.1 แนวทางการทดสอบ

ผู้ทำการทดสอบ ทำการขับเคลื่อนผ่านทางเครื่องจำลองการขับเคลื่อน ซึ่งทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงที่มีแบบจำลองยานยนต์อยู่ โดยกำหนดให้สัญญาณมุมเลี้ยวมาจากการหมุนพวงมาลัยที่เครื่องจำลองการขับเคลื่อน ผู้ทดสอบจะต้องวิ่งตามเส้นทางที่เห็นบนคอมพิวเตอร์แสดงผล

การขับขี่ ที่มีเส้นทางเดียวกันกับการทดสอบโดยใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl ผู้ทดสอบจะต้องขับตามทางเส้นทางดังกล่าวจำนวน 12 รอบต่อ 1 ครั้งการทดสอบในขณะที่ขับซึ่งจะมีการสร้างแรงบิดต้านการหมุนที่พวงมาลัยแทนความรู้สึกจากพื้นถนน เมื่อกำหนดให้ขนาดของแรงบิดแตกต่างกันตามอัตราขยายแรงบิด 4 ค่า คือ K1, K2, K3, และ K4 เป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 นิวตันเมตรต่อองศา ตามลำดับในแต่ละครั้งการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-19 ขณะทำการทดสอบ ผู้ทดสอบจะต้องไม่ทราบว่าแบบจำลองแรงบิดมีรูปแบบใดและขับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อมีอัตราขยายแรงบิดเป็น K4=3.0 เพื่อดูแนวโน้มของความล้าที่เกิดขึ้นเมื่อขับซึ่งเป็นเวลานาน



ภาพที่ 4-19 ลักษณะของแรงบิดเมื่ออัตราขยายมีค่า K1, K2, K3 และ K4

4.3.2.2 ผลที่ได้จากการใช้ชุดทดสอบ HHIL

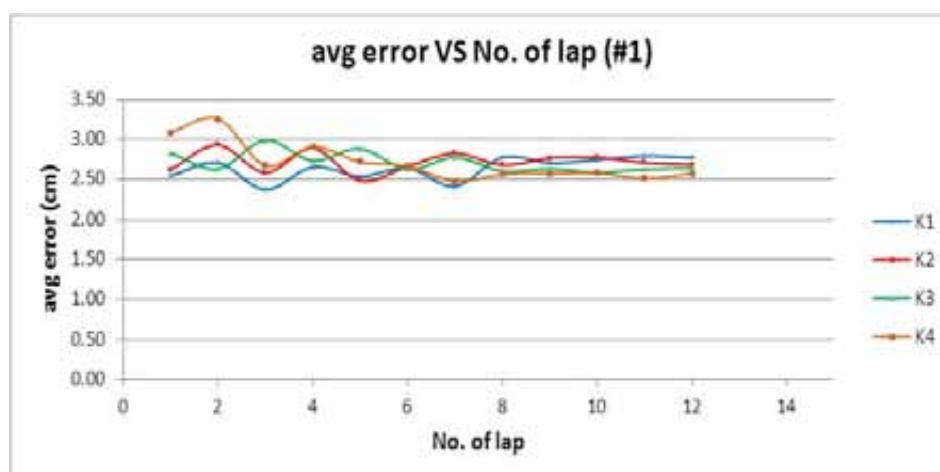
1) ทดสอบขับตามทางเส้นทางจำนวน 12 รอบต่อ 1 ครั้งการทดสอบ

พิจารณาผลเฉพาะในช่วงของการเลี้ยว ซึ่งการขับขี่ทดสอบ 12 ครั้ง ผู้ทดสอบ 2 คน โดยค่าความผิดพลาดจะพิจารณาจากการออกนอกเส้นทางที่กำหนด จากการทดสอบหาค่าความผิดพลาดจากการเลี้ยวโค้งพบว่าแต่ละรอบการขับขี่มีความผิดพลาดเฉลี่ยในการบังคับเลี้ยวดังแสดงในตารางที่ 4-4

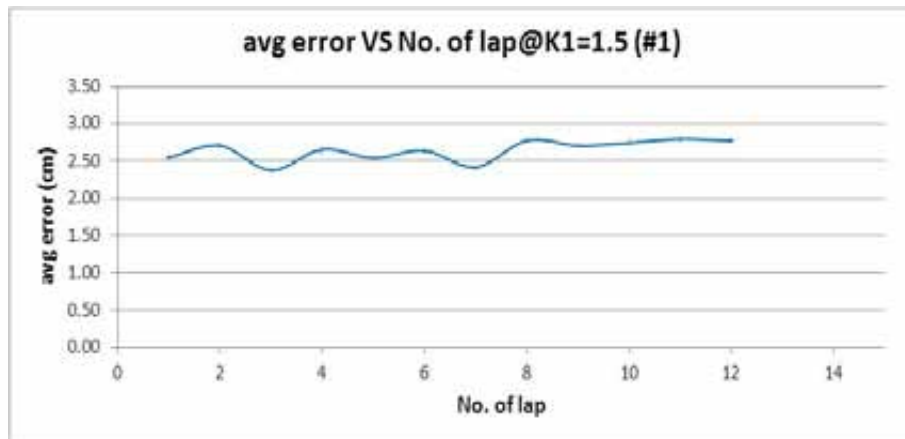
ตารางที่ 4-4 ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยวพิจารณาต่อรอบการขับขี่

รอบที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย คนที่ 1 (cm)				ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย คนที่ 2 (cm)			
	K1 = 1.5	K2 = 2.0	K3 = 2.5	K4 = 3.0	K1 = 1.5	K2 = 2.0	K3 = 2.5	K4 = 3.0
1	2.54	2.62	2.83	3.08	2.79	2.54	2.63	3.43
2	2.71	2.93	2.63	3.26	2.74	2.65	2.54	2.76
3	2.37	2.58	2.99	2.67	2.51	2.50	2.46	2.63
4	2.66	2.89	2.73	2.91	2.62	2.57	2.62	2.39
5	2.54	2.48	2.88	2.72	2.69	2.57	2.61	2.75
6	2.64	2.66	2.62	2.66	2.74	2.58	2.54	2.60
7	2.42	2.83	2.78	2.48	2.82	2.71	2.54	2.69
8	2.77	2.68	2.60	2.56	2.80	2.70	2.57	2.52
9	2.71	2.76	2.64	2.57	2.73	2.69	2.66	2.58
10	2.74	2.77	2.59	2.58	2.75	2.73	2.58	2.56
11	2.79	2.71	2.63	2.51	2.72	2.77	2.53	2.57
12	2.77	2.68	2.64	2.57	2.70	2.70	2.56	2.56

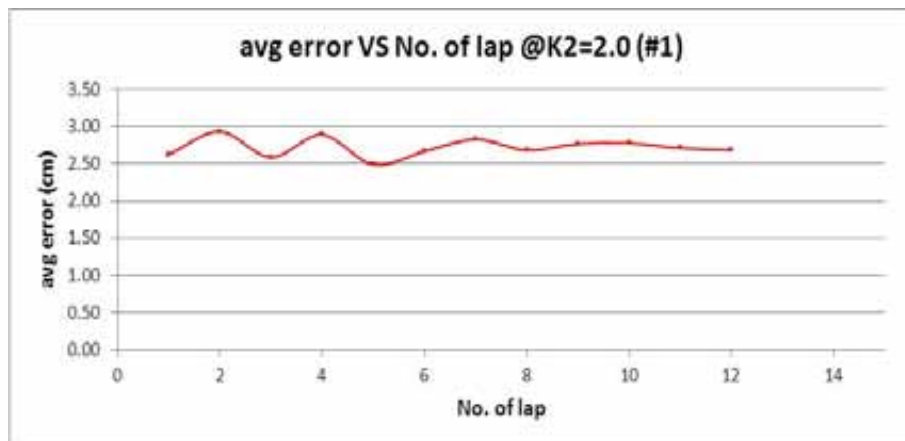
จากตารางที่ 4-4 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับรอบที่ขับขี่ตามแนวคิดในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ และเมื่อพิจารณาที่แต่ละอัตราขยาย สำหรับคนขับที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4-20 ถึง 4-24 และสำหรับคนขับที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-25 ถึง 4-29 ตามลำดับ



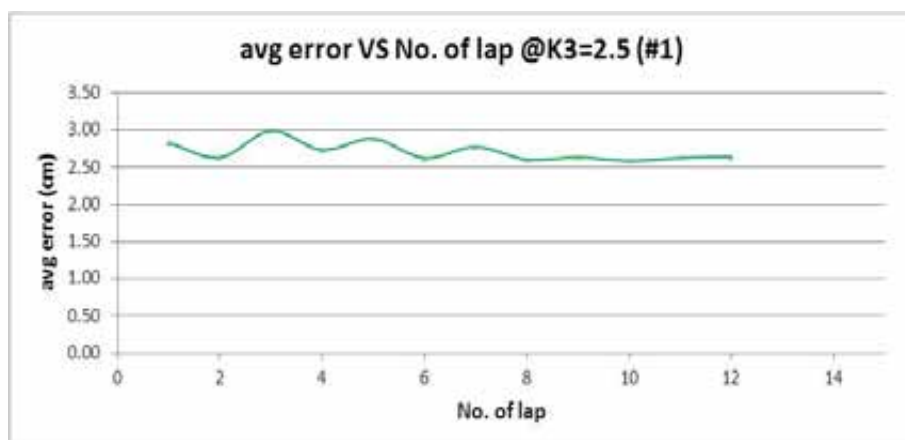
ภาพที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขี่ของคนขับที่ 1



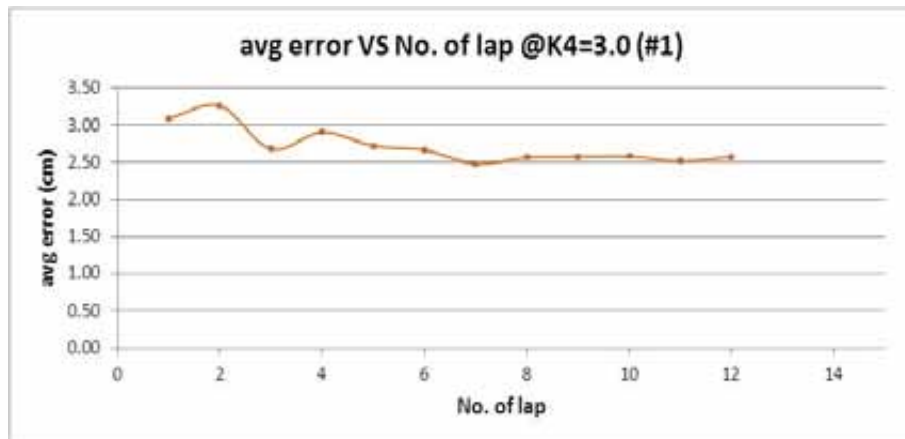
ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ของคนี่ 1 เมื่อ $K1=1.5$ นวัตกรรมต่อองศา



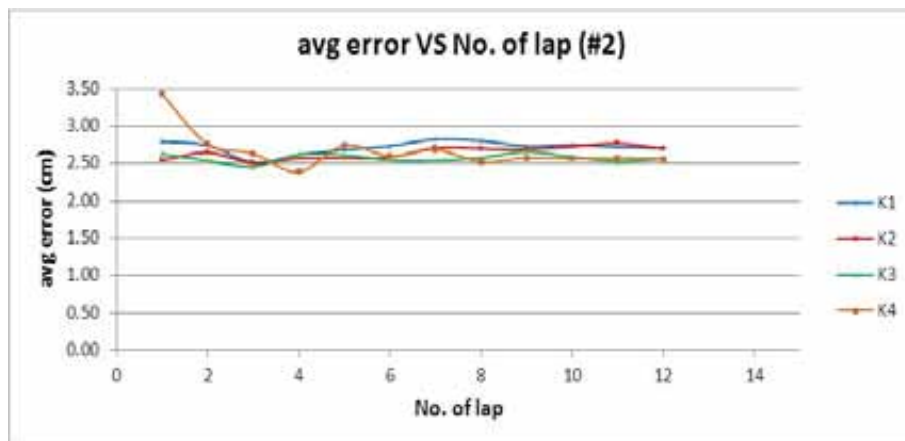
ภาพที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ของคนี่ 1 เมื่อ $K2=2.0$ นวัตกรรมต่อองศา



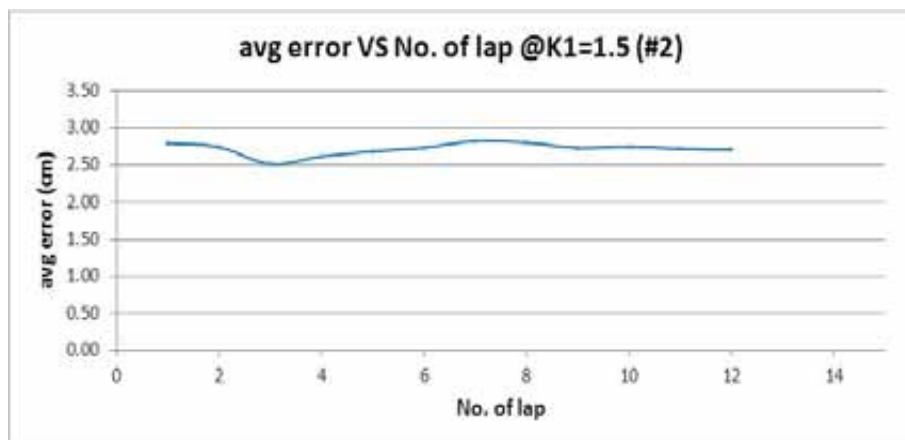
ภาพที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ของคนี่ 1 เมื่อ $K3=2.5$ นวัตกรรมต่อองศา



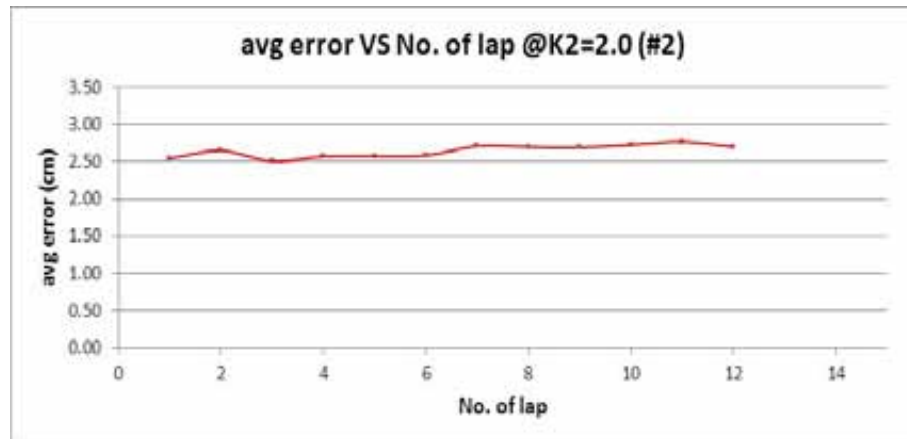
ภาพที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ขี่ของคนที่ 1 เมื่อ $K4=3.0$ นวัตกรรมต่อองศา



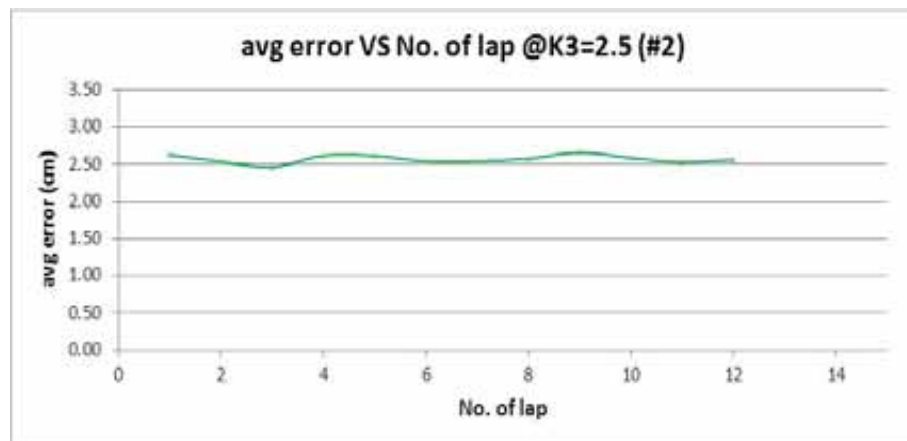
ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ขี่ของคนที่ 2



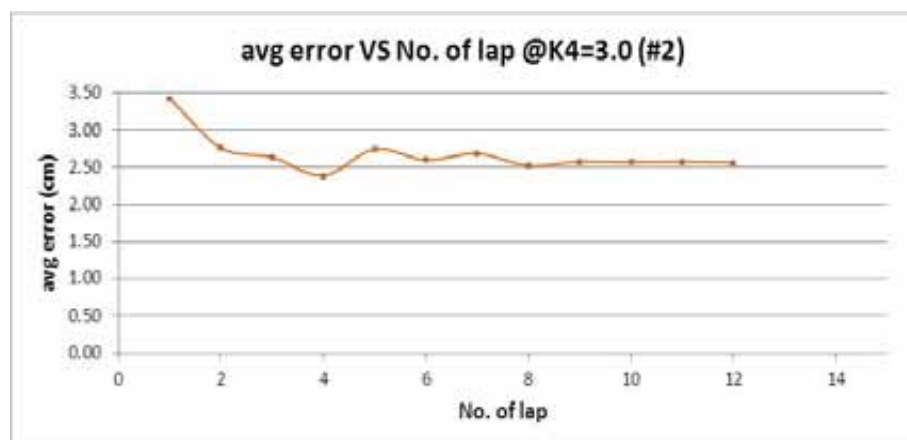
ภาพที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขี่ขี่ของคนที่ 2 เมื่อ $K1=1.5$ นวัตกรรมต่อองศา



ภาพที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขี่ของคนี่ 2 เมื่อ $K2=2.0$ นวัตกรรมต่อองศา



ภาพที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขี่ของคนี่ 2 เมื่อ $K3=2.5$ นวัตกรรมต่อองศา

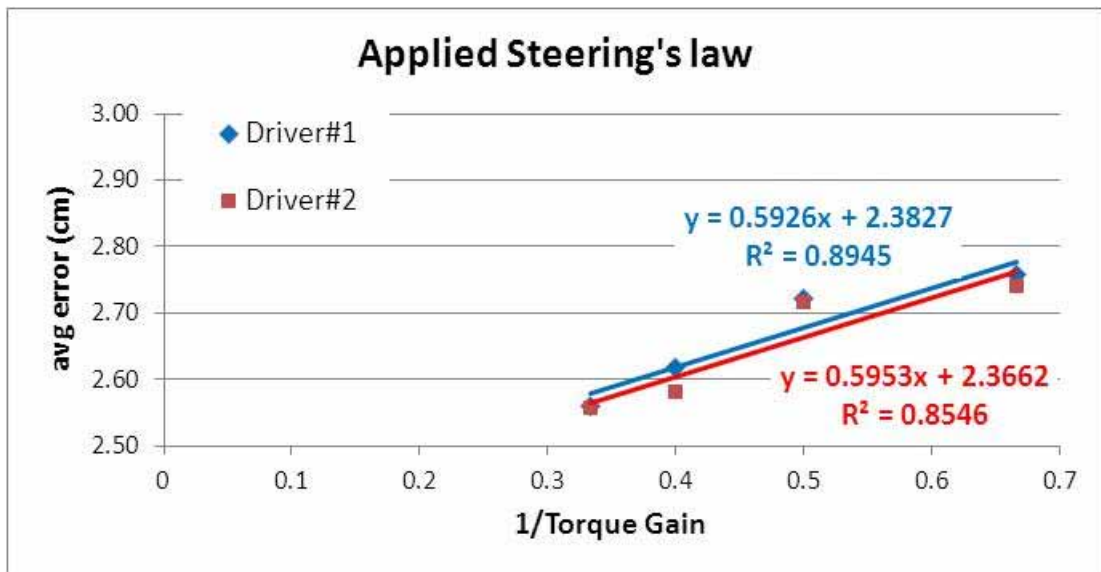


ภาพที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขี่ของคนี่ 2 เมื่อ $K4=3.0$ นวัตกรรมต่อองศา

จะสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกของการขับชี่ ค่าความผิดพลาดมีลักษณะแบบสุ่มตลอดการขับชี่ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการไม่มีประสบการณ์ในการขับชี่ผ่านเครื่องจำลองการขับชี่มาก่อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบังคับเลี้ยวไม่คงที่ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงหลังการขับชี่รอบที่ 7-8 การขับชี่ที่อัตราขยายเป็น K1, K2, K3 และ K4 จะพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดสู่ค่าคงที่หนึ่ง ซึ่งคล้ายกันกับการขับชี่ที่ใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl ค่าที่จะนำมาพิจารณาค่าความยากง่ายในการขับชี่จะพิจารณาในช่วงที่ค่าความผิดพลาดเข้าสู่ค่าคงที่ โดยพิจารณาการขับชี่ในแต่ละอัตราขยายแรงบิดได้ดังนี้

- อัตราขยาย K1=1.5 นิวตันเมตรต่อองศา ค่าความผิดพลาดเริ่มลู่เข้ารอบที่ 8, 9 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 1 คือ 2.76 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 2 คือ 2.74
- อัตราขยาย K2=2.0 นิวตันเมตรต่อองศา ค่าความผิดพลาดเริ่มลู่เข้ารอบที่ 8, 7 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 1 คือ 2.72 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 2 คือ 2.72
- อัตราขยาย K3=2.5 นิวตันเมตรต่อองศา ค่าความผิดพลาดเริ่มลู่เข้ารอบที่ 8, 10 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 1 คือ 2.62 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 2 คือ 2.58
- อัตราขยาย K4=3.0 นิวตันเมตรต่อองศา ค่าความผิดพลาดเริ่มลู่เข้ารอบที่ 8, 9 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 1 คือ 2.56 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่เข้าของคนี่ 2 คือ 2.56

โดยพบว่า ค่าความผิดพลาดที่แสดงถึงความยากง่ายในการขับชี่จะน้อยลง ซึ่งหมายถึงขับชี่ได้ง่ายขึ้น เมื่ออัตราขยายแรงบิดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดในการขับชี่กับค่าส่วนกลับของอัตราขยายของแรงบิด โดยจากผลการทดลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับส่วนกลับของอัตราขยาย

จากภาพที่ 4-30 เมื่อประมาณความสัมพันธ์เชิงเส้น จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R^2 ของคนขับทดสอบคนที่ 1 และคนที่ 2 มีค่าเป็น 0.8945 และ 0.8546 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยแปรผันตามส่วนกลับของอัตราขยายแรงบิด 89.45% และ 85.46% ซึ่งอาจสรุปได้ในเบื้องต้นว่า ความยากง่ายในการขับขี่สามารถแสดงได้อยู่บนรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการขับขี่และส่วนกลับของอัตราขยายแรงบิด โดยพบว่าเมื่ออัตราขยายแรงบิดเพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการขับขี่จะลดลงในรูปแบบของสมการที่ประยุกต์จากกฎของฟิตส์ โดยเมื่อพิจารณาสมการเชิงเส้นที่ได้กับสมการที่ (2-9) จะพบว่าส่วนกลับของความชันกราฟ คือดัชนีแสดงประสิทธิภาพในการทำงาน ในที่นี้คือทักษะในการขับขี่ของบุคคลนั้นๆ โดยพบว่า ทักษะในการขับขี่ของคนขับทดสอบคนที่ 1 และ 2 เป็นดังนี้

$$IP_{\#1} = \frac{1}{0.5926} = 1.6875$$

$$IP_{\#2} = \frac{1}{0.5953} = 1.6798$$

โดยจะพบว่าความสามารถหรือทักษะในการขับขี่ทดสอบของคนขับคนที่ 1 มากกว่าคนที่ 2 อยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การพิจารณาความยากง่ายในการขับขี่จากแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการขับขี่และส่วนกลับของอัตราขยายแรงบิดนั้น อาจมีความซับซ้อนมากกว่านี้เมื่ออัตราขยายแรงบิดมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

2) ทดสอบซ้ำตามทางเส้นทางเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

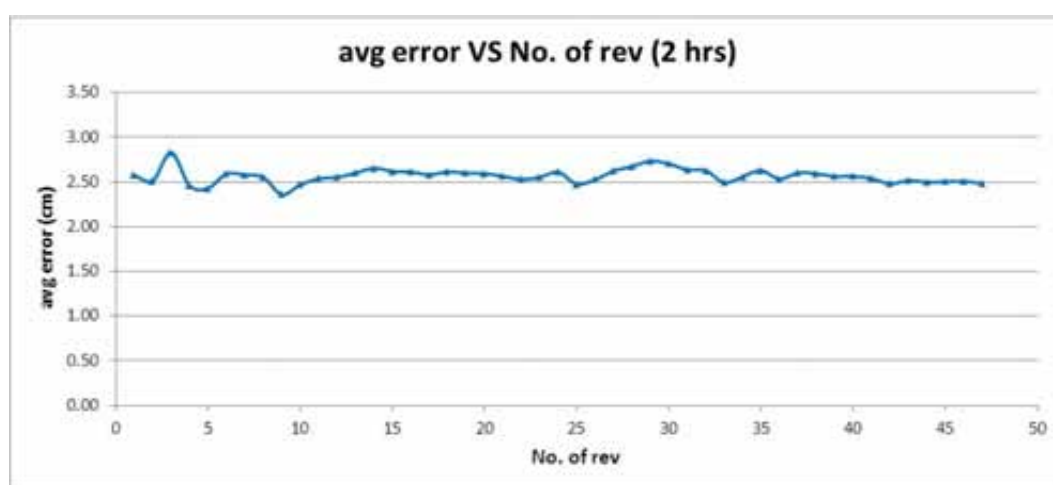
พิจารณาผลเฉพาะในช่วงของการเลี้ยงเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า จะได้ผลการทดสอบจากการเลี้ยง 94 ครั้ง พิจารณาแบบเดียวกับการซ้ำที่ใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดเชิงเส้นหาค่าความผิดพลาด จากการซ้ำแต่ละรอบมีความผิดพลาดเฉลี่ยในการบังคับเลี้ยงดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าความผิดพลาดจากการบังคับเลี้ยงเมื่อซ้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

รอบที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)	รอบที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)
1	2.57	25	2.48
2	2.51	26	2.53
3	2.83	27	2.62
4	2.46	28	2.67
5	2.43	29	2.73
6	2.59	30	2.70
7	2.58	31	2.64
8	2.55	32	2.63
9	2.36	33	2.49
10	2.47	34	2.56
11	2.54	35	2.63
12	2.55	36	2.53
13	2.60	37	2.60
14	2.65	38	2.59
15	2.62	39	2.56
16	2.61	40	2.56
17	2.58	41	2.54
18	2.61	42	2.48
19	2.60	43	2.52
20	2.59	44	2.50
21	2.56	45	2.50

รอบที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)	รอบที่	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (cm)
22	2.53	46	2.51
23	2.55	47	2.48
24	2.61		

จากตารางที่ 4-5 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับจำนวนรอบที่ขับขึ้นตามแนวคิดในหัวข้อที่ 2.5.3 เพื่อวิเคราะห์ความยากง่ายของงานและความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-31



ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับรอบที่ขับขึ้น เมื่อขับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จะสังเกตได้ว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้น มีลักษณะแบบสุ่มและเริ่มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ในรอบการขับขึ้นที่ 15 จากนั้นที่รอบที่ 24 ค่าความผิดพลาดในการขับขึ้นเริ่มเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงลู่เข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งในรอบการขับขึ้นที่ 43

การลู่เข้าสู่ค่าคงที่ของค่าความผิดพลาดในช่วงแรก (รอบการขับขึ้นที่ 15 ถึง 23) เป็นการแสดงค่าความยากง่ายในการขับขึ้น ซึ่งสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดในรอบที่ขับขึ้นๆ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าความผิดพลาด อาจเป็นผลเนื่องมาจากความเบื่อหน่ายในการขับมากกว่าความล้า เนื่องจากค่าความผิดพลาดในภายหลังเริ่มลู่เข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่ง โดยจากการสอบถามผู้ขับขึ้นพบว่า ผู้ขับขึ้นเกิดอาการเบื่อหน่ายในการขับขึ้นจริง และความรู้สึกดังกล่าวส่งผลให้ผู้ขับขาดสมาธิในการขับขึ้นไปในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงเริ่มตั้งใจขับขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงที่สอง (รอบการขับขึ้นที่ 43 ถึง 47) ซึ่งค่าที่จะนำมาพิจารณาหาค่าความยากง่ายในการขับขึ้นจะพิจารณาในช่วงที่ค่าความผิดพลาดลู่เข้าสู่ค่าคงที่ ดังนี้

- ช่วงแรก (รอบการขับชี่ที่ 15 ถึง 23) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่อู่เข้า คือ 2.58
- ช่วงแรก (รอบการขับชี่ที่ 43 ถึง 47) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลู่อู่เข้า คือ 2.50

จากการขับชี่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ยังไม่ปรากฏค่าความผิดพลาดเนื่องจากการล่าแต่อย่างใด เนื่องจากอัตราขยายแรงบิดอาจไม่มากพอหรือช่วงเวลาที่ใช้ในการขับยังน้อยเกินไป อีกทั้งลักษณะของแผนที่การขับชี่ที่ใช้มีเส้นทางในลักษณะทางตรงในช่วงเวลาระยะหนึ่ง ซึ่งนานพอให้ผู้ขับชี่ได้ผ่อนคลายจากการขับชี่เมื่อเลี้ยวโค้งได้ อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่า เมื่อผู้ขับชี่ขับเป็นเวลานาน ค่าความผิดพลาดจากการขับชี่มีแนวโน้มที่จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าค่าความผิดพลาดในการขับชี่จะลดลงเมื่อผู้ทดสอบมีประสบการณ์ในการขับชี่มากขึ้น

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการประเมินระบบบังคับด้วยไฟฟ้า ด้วยวิธี Human-Hardware-In-the-Loop หรือ HHIL โดยมีหลักการเบื้องต้นคือ การใช้ชิ้นส่วนหรือระบบจริงบางระบบแทนการใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนด้วยการใช้ชิ้นส่วนจริง และนำมนุษย์เข้ามามีส่วนร่วมในการทดสอบ โดยจะประยุกต์ใช้ชุดทดสอบดังกล่าวในการประเมินผลการขับชี่ด้วยระบบบังคับด้วยไฟฟ้า ด้านความยากง่ายของงานที่ทำและความล้าที่เกิดขึ้นขณะขับชี่ การจัดสร้างชุดทดสอบ HHIL กระทำโดยการประยุกต์นำชุดทดสอบ HIL-Hardware เดิมที่ประกอบไปด้วย ยาง ระบบรองรับและระบบบังคับด้วยไฟฟ้า ให้ทำงานร่วมกับเครื่องจำลองการขับชี่รถยนต์เดิม ซึ่งประกอบไปด้วยพวงมาลัย คันเร่งและเบรก โดยที่พวงมาลัยมีมอเตอร์ไฟฟ้าติดตั้งอยู่ เพื่อสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยแทนความรู้สึกจากถนนที่ได้จากการขับชี่จริง ลักษณะทางพลศาสตร์ของยานยนต์ จะจำลองด้วยแบบจำลองยานยนต์แบบ 4 ล้อ เมื่อกำหนดให้ไม่มีการโคลงของรถแบบ roll และ pitch กำหนดให้เป็นรถยนต์ขับเคลื่อนล้อหน้า วิ่งด้วยความเร็วคงที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในงานวิจัยนี้ การสร้างแรงบิดที่พวงมาลัย จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในขณะที่แรงและแรงบิดจริงที่กระทำที่ล้อนั้นสามารถวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท strain gage ซึ่งติดตั้งไว้ ค่าดังกล่าวจะถูกนำไปบันทึกเพื่อนำมาตรวจสอบระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบเท่านั้น เนื่องจากปัญหาทางด้านระบบสื่อสารภายในชุดทดสอบ HHIL ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป โดยการพัฒนาร่วมนี้จะรองรับการนำค่าแรงและแรงบิดนั้นมาอ้างอิงในการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยในอนาคต

การทำงานของชุดทดสอบ HHIL โดยรวม จะรับสัญญาณการขับชี่ นั่นคือ มุมเลี้ยว จากผู้ขับชี่ผ่านทางเครื่องจำลองการขับชี่ เมื่อเกิดการเลี้ยวขึ้นค่ามุมเลี้ยวจะถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลองยานยนต์เพื่อทำการคำนวณค่าสถานะต่างๆของรถยนต์ในแบบจำลอง ผลการคำนวณที่ได้จะใช้ในการควบคุมการทำงานของชิ้นส่วนจริง, การแสดงผลการขับชี่ผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้แสดงผล และควบคุมการสร้างแรงบิดที่พวงมาลัยแทนความรู้สึกจากพื้นถนน อันจะส่งผลให้ผู้ขับชี่สามารถขับชี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในการออกแบบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL นี้ ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นไปที่การเลือกอุปกรณ์ประมวลผล และช่องทางการสื่อสารที่เหมาะสม ซึ่ง

พิจารณาด้านเสถียรภาพของระบบเดิม และความเร็วในการทำงานของระบบเป็นสำคัญ จากการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลหลักและความเร็วในการทำงานของระบบแบบแยกส่วนและระบบโดยรวม ชุดทดสอบ HHIL จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประมวลผล 4 ชุด ได้แก่

- (1) NI CompactRIO เป็นอุปกรณ์ประมวลผลระดับรอง ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชิ้นส่วนจริง และเครื่องจำลองการขับเคลื่อน โดยเป็นแกนหลักในการรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งสื่อสารกับผู้ใช้งานผ่านทางคอมพิวเตอร์ notebook
- (2) NI PXI Controller เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณค่าแรงและแรงบิดที่ตรวจวัดได้จากตัวรับรู้และสอบเทียบค่าดังกล่าว
- (3) คอมพิวเตอร์แบบทำงานเวลาจริง ทำหน้าที่จำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ โดยเลือกใช้ชุดคำสั่ง xPC ของโปรแกรม MATLAB® Simulink ที่มีความสอดคล้องในการทำงานกับโปรแกรม NI LabVIEW® ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับ NI CompactRIO และ NI PXI Controller
- (4) ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Microsoft Visual Studio ซึ่งพัฒนาโดยใช้ภาษา C (C language) และ OpenGL library ในการแสดงผลสภาพการขับเคลื่อน (Visual Environment)

ช่องทางการรับ-ส่งข้อมูล ใช้การสื่อสารประเภท TCP/UDP ผ่านฮับซึ่งทำหน้าที่ในการจัดการช่องทางสื่อสารด้วยฟังก์ชันการเจรจาอัตโนมัติ ในรูปแบบระบบการสื่อสารเครือข่ายอีเทอร์เน็ต

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบ HHIL พบว่าอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลรวมไปถึงการประมวลคำสั่งควบคุมของระบบ HIL-Hardware และระบบเครื่องจำลองการขับเคลื่อนสามารถทำงานได้ที่ความเร็ว 500 และ 100 รอบต่อวินาที ตามลำดับ แต่ด้วยข้อจำกัดด้านอุปกรณ์สื่อสาร ทำให้ระบบทั้งสองทำงานร่วมกันเป็นชุดทดสอบ HHIL ได้ที่ 20 รอบต่อวินาที โดยพบว่าสาเหตุของความเร็วกว่าที่จำกัดนั้น เกิดจากการรับ-ส่งข้อมูลผ่านฮับของอุปกรณ์ประมวลผลมากกว่า 2 ตัว ซึ่งทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลระหว่างการรับ-ส่ง อีกทั้งยังมีปัญหาเนื่องจากสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์ประมวลผลแต่ละตัวที่ทำงานด้วยความเร็วแตกต่างกัน ปัญหาในส่วนนี้ สามารถแก้ไขได้โดยแยกเครือข่ายการสื่อสารออกเป็นแต่ละวงแยกกัน เพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล อีกทั้งยังสะดวกในการพัฒนาโปรแกรมให้อุปกรณ์ประมวลผลแต่ละส่วนทำงานด้วยความเร็วสัญญาณนาฬิกาที่สอดคล้องกัน ซึ่งการแยกเครือข่ายการสื่อสารดังกล่าว

สามารถนำมาใช้ได้โดยประยุกต์ใช้ชุดคำสั่งที่มีการพัฒนาแล้วโดย MATLAB® Simulink ในปีที่ผ่านมา (พ.ศ.2554) สำหรับงานวิจัยในปัจจุบัน (พ.ศ.2555) การใช้งานคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงแบบการสื่อสารหลายเครือข่ายยังไม่เป็นที่นิยมนัก อีกทั้งชุดคำสั่งดังกล่าวยังมีส่วนที่ผิดพลาดที่รอการปรับปรุงและพัฒนาเพิ่มเติมอยู่บ้าง ดังนั้น การแก้ไขระบบสื่อสารด้วยวิธีแยกเครือข่ายการสื่อสารจึงต้องการการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ ยังอาจสามารถพัฒนาในส่วนนี้ให้ดีขึ้นได้โดยการลดจำนวนอุปกรณ์ประมวลผลลง และเพิ่มหน้าที่การทำงานให้อุปกรณ์ประมวลผลบางเครื่อง เพื่อลดความซับซ้อนของระบบสื่อสารลงไป โดยการออกแบบหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลนั้นๆ ต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ชุดทดสอบ HHIL สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การใช้ชุดทดสอบ HHIL ในงานวิจัยทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้ชุดทดสอบเพื่อประเมินระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ เพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยากง่ายในการขับขี่และอัตราขยายของแรงบิดที่ทำให้ขนาดของแรงบิดแตกต่างกัน ค่าความยากง่ายในการขับขี่และความล้าที่เกิดขึ้นเมื่อขับเป็นเวลานานสามารถหาได้จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการขับขี่ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ค่าคงที่หนึ่ง ค่าคงที่ดังกล่าวจะแสดงถึงความยากง่ายในการขับขี่ โดยกำหนดการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งแตกต่างกันที่แบบจำลองที่ใช้ในการสร้างแรงบิดคือการสร้างแรงบิดจากแบบจำลอง Dahl ที่มีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมเลี้ยวเป็นรูปแบบวงฮีสเทอรีซิส และแบบจำลองแรงบิดเชิงเส้นที่มีอัตราขยายแรงบิดต่างๆกัน

ในส่วนแรกทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl เลือกใช้ตัวแปร β เป็นอัตราขยายแรงบิดที่ใช้ในการขับทดสอบ โดยกำหนดให้ผู้ขับขี่ขับเป็นเส้นตรง 1000 เมตร จากนั้นเลี้ยวโค้งเป็นครึ่งวงกลมรัศมี 220 เมตร ทั้งหมด 6 ครั้ง และ 14 ครั้งติดต่อกัน จากนั้นนำค่าความผิดพลาดในการขับขี่ที่เทียบกับเส้นทางการขับขี่จริง มาพิจารณาหาความสัมพันธ์กับครั้งที่มีการเลี้ยวเพื่อหาค่าความยากง่ายในการขับขี่จากแนวคิดด้านความล้าเมื่อขับเป็นเวลานานโดยใช้แบบจำลองแรงบิดที่มีตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 ที่ทำให้รูปแบบของแรงบิดแตกต่างกัน โดยค่าตัวแปร β ของแบบจำลองแรงบิดที่เลือกใช้นั้น เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 เท่านั้น หากเลือกเกินกว่าช่วงดังกล่าว ค่าของแรงบิดที่สร้างได้ตามแบบจำลอง Dahl จะเกิดการสั่น หรือไม่เสถียรขึ้น และเนื่องจากความแตกต่างของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับองศาการเลี้ยวเมื่อ β เป็น 1 นั้นใกล้เคียงกับรูปแบบเมื่อ β เป็น 0.5 และ 1.5 ดังนั้นเพื่อให้การสร้าง

แรงบิดที่พวงมาลัยเกิดความแตกต่าง จึงเลือกใช้ค่าอัตราการขยายเพียง 2 ค่าเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้กฎของพีตส์ในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยากง่ายในการขับขี่และอัตราขยายของแรงบิดได้

ในการทดสอบ ค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากตัวรับรู้ ที่ส่งผ่านมายัง NI PXI Controller จะถูกบันทึกไว้เท่านั้น ไม่ได้นำมาใช้อ้างอิงการสร้างแรงบิดด้านการหมุนที่พวงมาลัยแต่อย่างใด แต่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อรองรับงานวิจัยที่ใช้ชุดทดสอบ HHIL ในอนาคต จากการทดสอบพบว่าเมื่อพิจารณาตามแนวคิดด้านความยากง่ายและความล้าที่เกิดจากการขับขี่ การขับขี่ติดต่อกัน 6 รอบ เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการขับขี่เมื่อแบบจำลองแรงบิดใช้ตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 ค่าความผิดพลาดอยู่ในรูปแบบของการสุ่มที่มีรูปแบบไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะแนวโน้มค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงของการเรียนรู้ของผู้ขับขี่ (ช่วงที่ 1) ซึ่งทำให้ไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดทั้งในด้านของความยากง่ายในการขับขี่และความล้า เนื่องจากจำนวนรอบที่ขับขี่น้อยเกินไป แต่เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการขับขี่ติดต่อกัน 14 รอบ พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นอยู่ในรูปแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งอาจพิจารณาช่วงดังกล่าวเป็นค่าความผิดพลาดในช่วงที่ 1 ที่เป็นเรียนรู้ของผู้ขับขี่เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า แต่เมื่อพิจารณาที่รอบที่ 10 เป็นต้นไป จะพบว่า ค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งอาจพิจารณาช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่สอง ที่แสดงถึงความยากง่ายในการขับขี่ได้ โดยพบว่าความยากง่ายในการขับขี่เมื่อแบบจำลองแรงบิดมีตัวแปร β เป็น 0.5 และ 1.5 มีค่าเป็น 2.409 และ 2.251 ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน โดยการขับขี่เมื่อแบบจำลองแรงบิดมีตัวแปร β เป็น 1.5 ขับง่ายกว่าเมื่อมีตัวแปร β เป็น 0.5 เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การทดสอบนั้น ไม่ปรากฏผลเนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นขณะการขับขี่ได้ อาจเนื่องจากจำนวนรอบการขับทดสอบไม่มากเพียงพอ

ในส่วนที่สอง ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองแรงบิดเชิงเส้น โดยเลือกใช้อัตราขยายแรงบิด K1, K2, K3 และ K4 เป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 นิวตันเมตรต่อองศา ตามลำดับ ในการขับทดสอบ กำหนดให้ผู้ขับขี่ขับเป็นเส้นทางเดิมทั้งหมด 12 รอบ และขับเป็นระยะเวลาานาน 2 ชั่วโมงติดต่อกัน จากนั้นนำค่าความผิดพลาดในการขับขี่ที่เทียบกับเส้นทางขับขี่จริง มาพิจารณาค่าความสัมพันธ์กับรอบที่ขับขี่ จากนั้นจึงหาค่าความผิดพลาดซึ่งแสดงถึงความยากง่ายในการขับขี่จากแนวคิดด้านความล้าเมื่อขับขี่เป็นเวลานาน เพื่อนำมาประยุกต์ตามกฎของพีตส์ ในการประเมินแนวโน้มความสัมพันธ์ค่าความผิดพลาดในการขับขี่และอัตราขยายแรงบิดต่อไป

จากผลการทดสอบ พบว่าการขับขี่ที่อัตราขยาย K1, K2, K3, และ K4 เป็น 1.5, 2.0, 2.5, และ 3.0 นิวตันเมตรต่อองศา ตามลำดับ พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด

ในช่วงเริ่มต้น มีลักษณะแบบสุ่มและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่หนึ่ง คล้ายกันกับการซัฟฟี่ที่ใช้แบบจำลองแรงบิด Dahl ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เข้าสู่สภาวะคงที่ คือค่าที่แสดงถึงความยากง่ายในการซัฟฟี่โดยพบว่าความยากง่ายในการซัฟฟี่เมื่อแบบจำลองแรงบิดมีอัตราขยาย K1, K2, K3 และ K4 มีค่าลดลงตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดที่แสดงถึงความยากง่ายในการซัฟฟี่จะน้อยลง ซึ่งหมายถึงซัฟฟี่ได้ง่ายขึ้น เมื่ออัตราขยายแรงบิดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ในการหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดในการซัฟฟี่กับอัตราขยายของแรงบิดที่ลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการทำนายแนวโน้มค่าความยากง่ายในการซัฟฟี่จากอัตราขยายแรงบิดในเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาลักษณะความสัมพันธ์เมื่ออัตราขยายแรงบิดมีค่าอื่นๆ เพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ต่อไป

ผลการทดสอบทั้งหมดนี้แสดงถึงความสามารถและประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์ HHIL ในการทดสอบระบบบังคับด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นเพียงแนวทางหนึ่งในการทดสอบระบบในยานยนต์เท่านั้น อีกทั้งเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ในการประเมินความยากง่ายและความล่าช้าที่เกิดขึ้นจากการซัฟฟี่ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาระบบบังคับด้วยไฟฟ้าได้ ก่อนการทดสอบกับระบบในยานยนต์จริง ผู้วิจัยคาดหวังว่าชุดทดสอบ HHIL และแนวคิดการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์นี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาระบบบังคับด้วยไฟฟ้าภายในยานยนต์ได้อย่างกว้างขวางต่อไปในอนาคต

5.2 งานวิจัยต่อเนื่องและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางการประเมินระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า ด้านความยากง่ายในการขับขี่และความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ โดยการใช้ชุดทดสอบ HHIL โดยการใช้กฎของฟิตส์มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งกำหนดให้ยานยนต์ไม่มีการโคลงแบบ roll และ pitch อีกทั้งใช้แรงบิดที่พ่วงมาด้วยมาจากแบบจำลอง Dahl ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังนั้นในงานวิจัยขั้นต่อไปอาจทำได้โดยพัฒนาแบบจำลองให้รองรับการโคลงทั้ง roll และ pitch และใช้ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริงที่ล้อเป็นค่าอ้างอิงในการสร้างแรงบิดที่พ่วงมาด้วย หรือเลือกใช้ตัวแปรอื่นที่เหมาะสมในการพิจารณาหาความยากง่ายในการขับขี่ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดในการขับขี่และอัตราขยายของแรงบิด อีกทั้งการทดสอบการขับขี่ในช่วงเวลาที่นานขึ้นเพื่อพิจารณาด้านความล้าที่เกิดขึ้นจากการขับขี่ เป็นต้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยในอนาคตอาจทำการศึกษาระบบอื่นภายในยานยนต์ เช่น ลักษณะของระบบรองรับที่ทำให้เกิดความสบายในการขับขี่โดยใช้ชุดทดสอบ HHIL เป็นต้น หรือนำแนวคิดการประยุกต์ใช้กฎของฟิตส์ศึกษาหาลักษณะของแรงบิดที่เหมาะสมที่สุด (optimized) ในระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า ที่ทำให้ผู้ขับขี่สามารถขับขี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และเกิดความล้าน้อยที่สุดได้

5.3 การเผยแพร่ผลงานการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือรวบรวมบทความการประชุมระดับนานาชาติ 4 บทความ และการนำเสนอรูปแบบโปสเตอร์ระดับชาติ 1 ครั้ง ได้แก่

5.3.1 การประชุมระดับนานาชาติ

1. ชื่อบทความ : Human-Hardware-In-the-Loop Simulator (HHILs) for Steer-by-Wire Testing (Part 1: Design of HHILs communication system)
ชื่อการประชุม : 2010 JSAE KANTO International Conference of Automotive Technology for Young Engineers (ICATYE)
วันที่ 9 มีนาคม พุทธศักราช 2554 มหาวิทยาลัย Keio เมืองโยโกฮาม่า ประเทศญี่ปุ่น
2. ชื่อบทความ : Human-Hardware-In-the-Loop simulator (HHILs) for Vehicle Testing
ชื่อการประชุม : 7th International Conference on Automotive Engineering
วันที่ 28 มีนาคม ถึง 1 เมษายน พุทธศักราช 2554 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
3. ชื่อบทความ : Communication Design of Human-Hardware-In-the-Loop simulator (HHILs) for Steer-by-Wire Testing
ชื่อการประชุม : 2nd International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME)
วันที่ 19-21 ตุลาคม พุทธศักราช 2554 จังหวัดกระบี่ ประเทศไทย
4. ชื่อบทความ : Human-Hardware-In-the-Loop simulator (HHILs) for Steer-by-Wire Evaluation
ชื่อการประชุม : 8th International Conference on Automotive Engineering
วันที่ 3 เมษายน พุทธศักราช 2555 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

5.3.2 การนำเสนอรูปแบบโปสเตอร์

1. ชื่อบทความ : Human-Hardware-In-the-Loop simulator (HHILs) for Steer-by-Wire Evaluation
ชื่อการประชุม : 5th IPS (Graduate School of Information, Production and Systems) International Collaboration Symposium
วันที่ 11-12 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2554 มหาวิทยาลัย Waseda เมืองฟูกูโอกะ ประเทศญี่ปุ่น

รายการอ้างอิง

- [1] Paul, Y. (2005). Steer-by-Wire: Implications for Vehicle Handling and Safety, Stanford University, California.
- [2] Jang, S.H., Park, T.J., and Han, C.S., A control of vehicle using Steer-by-Wire system with Hardware-In-the-Loop-Simulation system. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (July 2003).
- [3] Sanket, A., Farhad, B., Jon, D., and Scott, M., A Control System Methodology for Steer by Wire Systems. 2004 SAE International (January 2004).
- [4] Frederick, M.D., Steer by Wire System with Feedback. United States Patent number 6,097,286 (August 2000).
- [5] Elmar, D., and others. Steer-by-Wire Steering System for Motorized Vehicles. United States Patent number 6,219,604 B1 (April 2001).
- [6] Bertacchini, A., Tamagnini, L., and Pavan, P., Force Feedback in Steer-by-Wire System: Architecture and Experimental Results. IEEE ISIE 2006 (July 2006): 3050-3055.
- [7] Park, T.J., Han, C.S., and Lee, S.H., Development of the electronic control unit for the rack-actuating steer-by-wire using the hardware-in-the-loop simulation system, Mechatronics 15 (October 2005): 899-918.
- [8] Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., and Droulez, J., Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator. DSC North America 2003 (October 2003).
- [9] Amberkar, S., Bolourchi, F., Demerly, J., and Milisap, S., A Control System Methodology for Steer by Wire Systems, 2004 SAE World Congress (March 2004).

- [10] Kim, C.L., Jang, J.H., Oh, S.K., Lee, J.Y., Han, C.S., and Hedrick, J.K., Development of a control algorithm for a rack-actuating steer-by-wire system using road information feedback, the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2008222: 1559-1571.
- [11] Carlos, C.W., Panagiotis, T., Efstathios, V., Michel, B., and Gerard, G., Dynamic Friction Models for Road/Tire Longitudinal Interaction. Vehicle System Dynamics. (October 2002).
- [12] Saelem, S., Chantranuwathana, S., Panichanun, K., Prempreeda, P., Wichienprakarn, P., and Kruo-ongarjnkool, P., Experimental Verification of Leaf Spring Model by Using a Leaf Spring Test Rig. The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand. Chiang Mai, Thailand. November 2009.
- [13] Pacejka, H.B., Tyre and Vehicle Dynamics. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [14] เอกพงษ์ ธีระวร, ชยุตม์ ลิ้มปิผลไพบูลย์, ทศพร เหลืองวิไลย์, ธนพล พุกวัฒนะ, นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์. การพัฒนาระบบจำลองการขับขีเพื่อศึกษาแรงป้อนกลับที่พวงมาลัย. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. ชลบุรี. 2550.
- [15] Levent, G., Bilin, A.G., Tefvik, Y., and Eyiip, S.O., HIL System for Steering Controller Tests. Control Applications IEEE (2003): 13-18.
- [16] Saffet, A., Robert, F., Sean, V., Jack, B., and Dilek, A., Modeling and stability analysis of a simulation–stimulation interface for hardware-in-the-loop applications. Simulation Modeling Practice and Theory 15 (July 2007): 734-746.
- [17] สุรเชษฐ์ สุขไชยพร. ระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- [18] ธนพล พัวพัฒนกุล, ชาญวิทย์ วุฒิเลิศอนันต์, ชลยุทธ อ่องมณี และกมลชนก ทรัพย์สามารถ. การออกแบบและสร้างเครื่องจำลองการขับขีแบบ 2 ระดับขั้นเสรี. MECHANICAL

- ENGINEERING PROJECT ACADEMIC YEAR 2008, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- [19] วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์, ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์, รัชทิน จันทรเจริญ และนักสิทธิ์ นุ่มวงษ์.
โครงการวิจัยการพัฒนารูปแบบใหม่ของระบบประเมินผลศาสตร์ยานยนต์การขับขี่และ
ระบบขึ้นส่วนยานยนต์. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2549.
- [20] กนกกร เปี่ยมเชาว์, ทิพวรรณ ชัยนำยนต์, ภูบดี วณิชชาธรรมกุล และภูวเดช ฉัตรพรณกุล.
การศึกษาผลของระบบรักษาช่องทางการขับขี่ต่อพฤติกรรมมนุษย์โดยใช้ระบบจำลองการ
ขับขี่ยานพาหนะ.MECHANICAL ENGINEERING PROJECT ACADEMIC YEAR
2009, คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- [21] พุทธิพงษ์ คงรอด และวิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ
มนุษย์ในงานปฏิสัมพันธ์กับคอมพิวเตอร์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทยครั้งที่ 25. ระเบียบ. 18 – 21 ตุลาคม 2554.
- [22] Shannon's Theorems 17, a fundamental theorem of communication system, 1949.
- [23] ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์. เอกสารประกอบการสอนวิชา Automotive Control. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [24] ฉัตรชัย หงส์อุเทน. กลศาสตร์ยานยนต์ I. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [25] Michael, S., Michael, J.P., and Qiang, H., Simulation of Vehicle Longitudinal
Dynamics, Embedded Systems Laboratory University of Leicester.Technical
Report ESL 04-01 (October 2004).
- [26] Noomwongs, N., Yoshida, H., Nagai, M., Kobayashi, K., and Yokoi, T. Study on
Handling by Using Tire Hardware-In-the-Loop Simulator.Japanese Society of
Automotive Engineers, JASE Review 24 (October 2003): 457-464.
- [27] MacKenzie, S.I., Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer
Interaction. Human-Computer Interaction, 7, University of Toronto : Lawrence
Erlbaum Associates, Inc., 1992. pp.91-139.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Fitts' law

ภาคผนวก ก

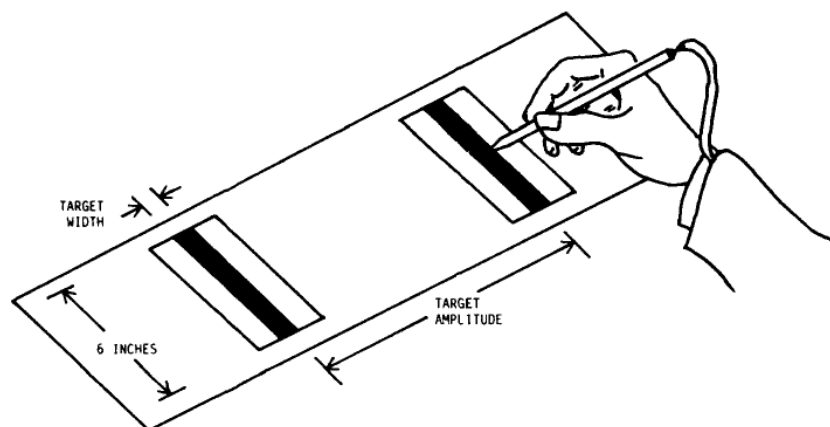
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Fitts' law

กฎของฟิตส์คือรูปแบบจำลองพฤติกรรมกรรมการตอบสนองของร่างกายมนุษย์ (Human Psychomotor Behavior) ซึ่งได้จากการพิจารณาและสร้างขึ้นโดยอาศัยทฤษฎีข่าวสารของ แชนนอน [22] ซึ่งเป็นกฎที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ฟิตส์ได้เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ดังกล่าว ว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับการส่งผ่านข้อมูล

การส่งผ่านข้อมูลนั้นจะต้องอาศัยช่องทางในการส่ง เมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลเชิงอิเล็กทรอนิกส์ ช่องทางในการส่งคือการส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง ซึ่งอาจมีการรบกวนจากสัญญาณอื่น ที่อาจส่งผลให้ความจุข้อมูลของช่องทางนั้นมีค่าน้อยกว่าความจุข้อมูลสูงสุดที่เป็นไปได้ ทฤษฎีของแชนนอนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุข้อมูลที่ได้ประสิทธิภาพ (C, bits/s) ของช่องทางการสื่อสารนั้น กับความกว้างช่วงความถี่ (Bandwidth, B , 1/s หรือ Hz) ได้ดังสมการที่ (ก-1)

$$C = B \log_2 \frac{S+N}{N} \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ S คือกำลังของสัญญาณ และ N คือกำลังของสัญญาณรบกวน



ภาพที่ ก-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ฟิตส์พิจารณาใช้ [27]

หลักการของฟิตส์ถูกนิยามขึ้น ด้วย 2 หลักการ ดังนี้

หลักการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่

กำลังของสัญญาณสามารถแสดงได้เป็นค่าดัชนีความยาก (Indices of Difficulty) ซึ่งสามารถวัดได้ในรูปของบิตข้อมูล (Information Matrix Bits) ในการทำงานให้สำเร็จ เมื่อพิจารณาการทำงานโดยมนุษย์ ช่องทางการรับส่งข้อมูลจะเป็นช่องทางของมนุษย์ (Human Channel) ที่จำเป็นต้องมีการส่งผ่านข้อมูลเป็นจำนวนหลายบิต ซึ่งอัตราการส่งผ่านในหน่วยบิตต่อวินาทีหรือประสิทธิภาพในการทำงาน จะพิจารณาจากการนำจำนวนบิตที่ได้มาหารด้วยเวลาที่ใช้ในการทำงาน

หลักการเกี่ยวกับองค์ประกอบด้านกลศาสตร์และมนุษย์

องค์ประกอบด้านกลศาสตร์และมนุษย์เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของมนุษย์ผ่านทางทวิเคราะห์ด้วยกฎของฟิตส์ แต่เนื่องจากการพิจารณาการทำงานของมนุษย์นั้น ไม่สามารถนิยามช่องทางและความจุข้อมูลของช่องทางได้อย่างชัดเจนแน่นอน เพราะการทำงานของมนุษย์ประกอบด้วยปัจจัยหลายประการ ทั้งความสามารถของบุคคล การตอบสนองของร่างกาย ความเคยชิน ทักษะ และอารมณ์ ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ดังนั้น ดัชนีความยากในการวัดองค์ประกอบด้านระบบประสาทและสัญญาณจึงถูกนำไปรวมกับความจุข้อมูลของช่องทางมนุษย์

เมื่อพิจารณาจากหลักการทั้งสองข้างต้นแล้ว การทำงานโดยระบบควบคุมของมนุษย์ ความจุข้อมูลจะถูกแทนด้วยดัชนีประสิทธิภาพ (Index of Performance, IP) ซึ่งสามารถหาได้โดยการหารดัชนีความยากด้วยเวลาที่ใช้ในการทำงาน (Movement Time, MT) ดังแสดงในสมการที่ (ก-2)

$$IP = ID / MT \quad (ก-2)$$

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (ก-1) จะพบว่า

IP คือ C

ID คือ พจน์ลอการิทึม

MT คือ 1/B

จากแนวคิดของฟิตส์ที่ว่า สัญญาณนั้นเปรียบเสมือนระยะทางที่เคลื่อนที่ (Amplitude, A) และสัญญาณรบกวน คือ ความคาดเคลื่อนที่ยอมรับในการเคลื่อนที่หรือความกว้าง (Width, W) ของจุดสิ้นสุดที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาพจน์ลอการิทึม จะสามารถเขียนได้ตามทฤษฎีของแซนนอน [22] ดังสมการที่ (ก-3)

$$ID = \log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \quad (\text{ก-3})$$

โดยพจน์ภายในลอการิทึมจะไม่มีหน่วย เพราะ A และ W ต่างก็เป็นหน่วยของระยะทั้งคู่ ID จึงถูกกำหนดให้มีหน่วยเป็น Bits เนื่องจากลักษณะของค่า ID ที่เป็น logarithm ฐานสอง

การกำหนดให้ ID เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และ MT เป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) เป็นรูปแบบที่นิยมใช้มาก สำหรับการทดลองใดๆ จะเป็นการเคลื่อนที่ด้วยระยะ A ที่มีความกว้าง W ให้เร็วและแม่นยำที่สุด ดัชนีประสิทธิภาพสามารถหาได้จากสมการ (ก-2) หรือหาได้จากการหาความสัมพันธ์เชิงถดถอยของ MT เทียบ ID ซึ่งจะได้เป็นสมการถดถอยเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (ก-4)

$$MT = a + b(ID) \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่ถดถอย และส่วนกลับของความชันสามารถเทียบได้กับ IP ในสมการ (ก-2) โดยสามารถเขียนในรูปแบบที่นิยมทั่วไปได้ ดังสมการที่ (ก-5)

$$MT = a + b \left(\log_2 \left(\frac{2A}{W} \right) \right) \quad (\text{ก-5})$$

เลข 2 ในลอการิทึมใส่เข้าไปเพื่อให้แน่ใจว่าพจน์ลอการิทึมจะเป็นบวก ซึ่งจะมีผลทำให้ ID มีค่าเพิ่มขึ้น 1 bit สำหรับแต่ละงาน (Task Condition) ซึ่งค่าลอการิทึมดังกล่าวจะไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง MT และ ID จากสมการที่ (ก-5) สังเกตได้ว่า เมื่อระยะทางมีค่าเพิ่มขึ้นสองเท่าหรือเมื่อความกว้างลดลงครึ่งหนึ่ง จะส่งผลให้ ID มีค่าเพิ่มขึ้น 1 bit ซึ่งหมายถึง ID เป็นตัวแสดงที่ดีของผลกระทบรวมจากตัวแปรสองตัว

กฎของฟิตส์นั้น ถูกพัฒนาและนำไปใช้อย่างแพร่หลาย จนเกิดข้อแนะนำในการออกแบบการทดลองด้วยกฎของฟิตส์ ดังนี้

1. ใช้รูปแบบดัชนีความยากของสมการแซนอน ด้วยสมการ (ก-6)

$$MT = a + b \left(\log_2 \left(\frac{A + 0.5W}{W} \right) \right) \quad (\text{ก-6})$$

2. ออกแบบการทดลองให้ช่วง ID มีค่ากว้างเพียงพอ ที่ครอบคลุมช่วงของการทำงาน และเพื่อความเหมาะสมในการสร้างสมการจากผลการทดลอง ควรทดลองแต่ละเงื่อนไขประมาณ 15 – 25 ครั้ง
3. การหาความคลาดเคลื่อนของจุดสิ้นสุด ให้วัดการกระจายของตำแหน่งสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองจริง

4. พิจารณาการเคลื่อนที่จริงที่ผู้ทดลองกระทำ เพื่อให้สมการมีความแม่นยำมากขึ้น
5. สร้างสมการถดถอยเพื่อพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลกับกฎของฟิตส์
6. การนำผลการทดลองไปคาดการณ์การเคลื่อนที่ควรเป็นการคาดการณ์ในช่วงที่ทดลอง (Interpolation) และความคลาดเคลื่อนที่ได้ประมาณ 4%
7. หากจุดประสงค์ในการทดสอบเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสองเงื่อนไขของการทดลอง หรือมากกว่านั้น จะต้องหาค่า Throughput (TP) ของแต่ละผู้ทดสอบ และหาค่าเฉลี่ย เพื่อหา Grand Throughput ดังสมการ (ก-7)

$$TP = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^y \left(\frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \frac{IDe_{ij}}{MT_{ij}} \right) \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ x แทนจำนวนเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ และ y แทนจำนวนของผู้ทดสอบ

ภาคผนวก ข

รายละเอียดอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในชุดทดสอบ HHIL

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในชุดทดสอบ HHIL

อุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในชุดทดสอบ HHIL ประกอบด้วย NI CompactRIO, NI PXI Controller, คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง และคอมพิวเตอร์แสดงผลการจับชี้ ซึ่งอุปกรณ์ประมวลผลแต่ละชิ้นมีคุณสมบัติและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดดังนี้

ข.1 NI CompactRIO



ภาพที่ ข-1 อุปกรณ์ประมวลผล NI CompactRIO

NI CompactRIO เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท National Instruments Corporation ซึ่งเป็น PAC (Programmable Automation Controller) ประเภทหนึ่ง โดยนำเอาคุณสมบัติเด่นในเรื่องขนาดและความทนทานของ PLC (Programmable Logic Controller) และ ความยืดหยุ่นกับประสิทธิภาพของชุดคำสั่งที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์ (Personal Computer; PC) เข้าไว้ด้วยกัน ในส่วนของ hardware ของ NI CompactRIO จะประกอบด้วยช่องรับสัญญาณเข้า-ออก โครงสร้างของ FPGA (Field-Programmable Gate Array) โดยเป็นการควบคุมแบบฝังตัวที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ เป็นผลทำให้สามารถสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและสามารถทำงานบนสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาและการใช้งาน NI CompactRIO นี้ จะกระทำบนโปรแกรม NI LabVIEW[®] ซึ่งเป็นโปรแกรมลักษณะภาษาภาพ (graphical language) ที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจอีกทั้งยังช่วยลดงานในการเขียนโปรแกรมในส่วนควบคุมการแสดงผล (Graphic User Interface - GUI) ลงได้อย่างมาก

NI CompactRIO มีหลายรูปแบบแบ่งตามชนิดของการใช้งาน โดย NI CompactRIO ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็น NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1คุณสมบัติของ NI CompactRIO ประเภท Value รุ่น NI cRIO9074

General	
Product Name	cRIO-9074
Form Factor	CompactRIO
Product Type	Controller (Computing Device)
Part Number	779999-01
Operating System/Target	Real-Time
LabVIEW RT Support	Yes
CE Compliance	Yes
Reconfigurable FPGA	
FPGA	Spartan-3
Gates	2000000
Chassis	
Number of Slots	8
Integrated Controller	Yes
Input Voltage Range	19 V , 30 V
Recommended Power Supply: Power	48 W
Recommended Power Supply: Voltage	24 V
Power Consumption	20 W
Physical Specifications	
Length	28.97 cm
Width	8.73 cm
Height	5.89 cm
Weight	929 gram
Minimum Operating Temperature	-20 °C
Maximum Operating Temperature	55 °C
Maximum Altitude	2000 m

* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203964> [ONLINE]

จากตารางที่ ข-1 จะสังเกตได้ว่า NI CompactRIO รองรับโมดูลช่องสัญญาณเข้าและออกจำนวน 8 โมดูล ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมสำหรับงานประเภทต่างๆ งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความโดดเด่นในด้านนี้ของ NI CompactRIO จึงเลือกใช้อุปกรณ์ประมวลผลดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ประมวลผลระดับรอง เพื่อจัดการการรับ-ส่งสัญญาณภายในชุดทดสอบ HHIL โดยโมดูลหลักที่เลือกสำหรับงานวิจัยนี้มี 3 แบบ คือ

- NI 9264: 16-Channel, ± 10 V, 16-Bit Analog Voltage Output Module
- NI 9411: 6-Channel Differential Digital Input Module (x3modules)
- NI 9205: 32-Channel, ± 200 mV to ± 10 V, 16-Bit Analog Input Module

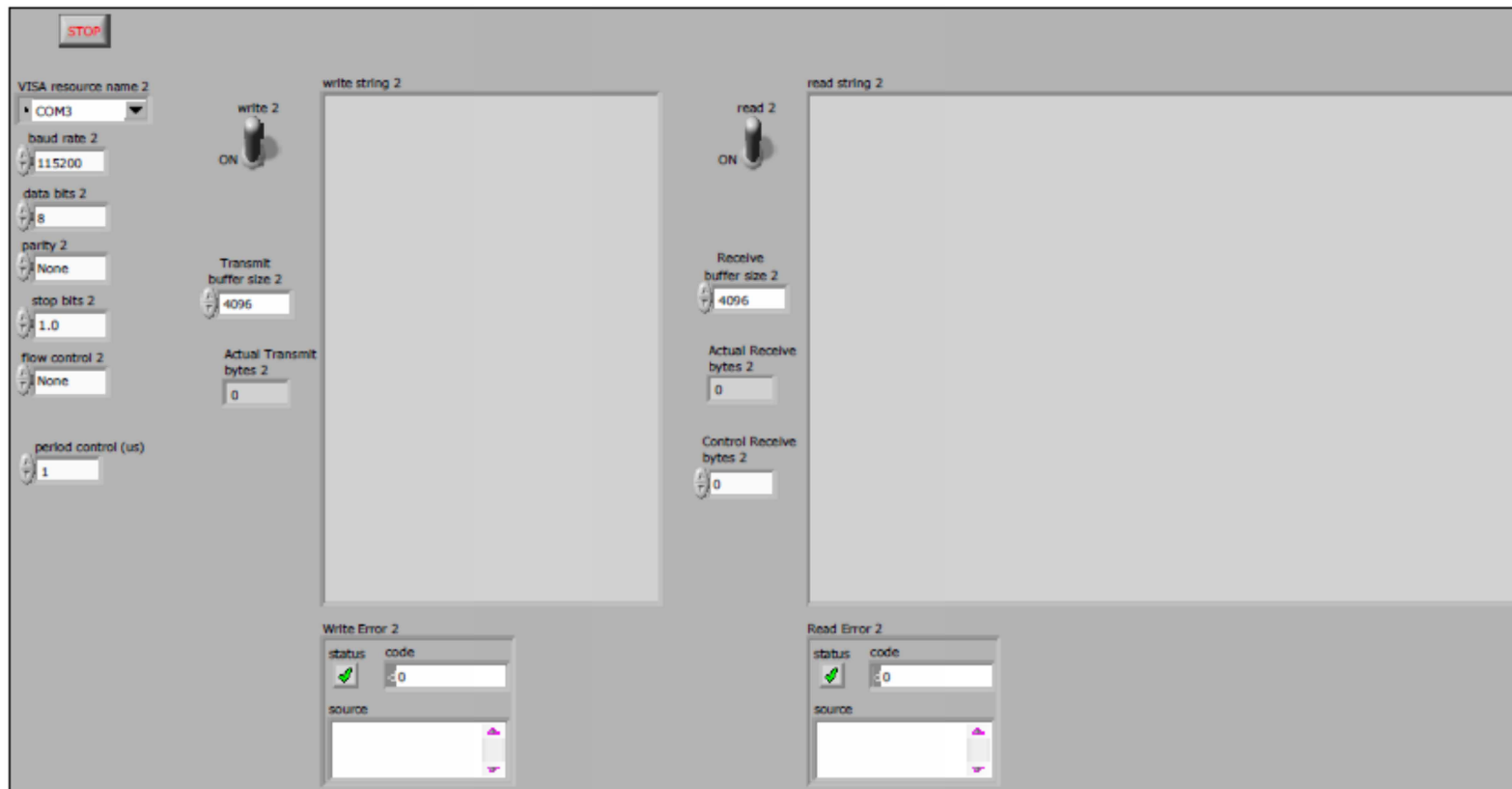
การพัฒนาส่วนของการควบคุมด้วยโปรแกรม NI LabVIEW[®] นั้น จะกระทำบนคอมพิวเตอร์ notebook ซึ่งมีโปรแกรมหังกล่าวอยู่ เมื่อทำการพัฒนาโปรแกรมแล้วจะต้อง compile ลงบน NI CompactRIO จากนั้นจึงควบคุมโปรแกรมผ่านทางคอมพิวเตอร์ notebook นั้น โดยในโปรแกรมจะมีกล่องอุปกรณ์ (tool box) หลากหลายรูปแบบตามการใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ ข-2



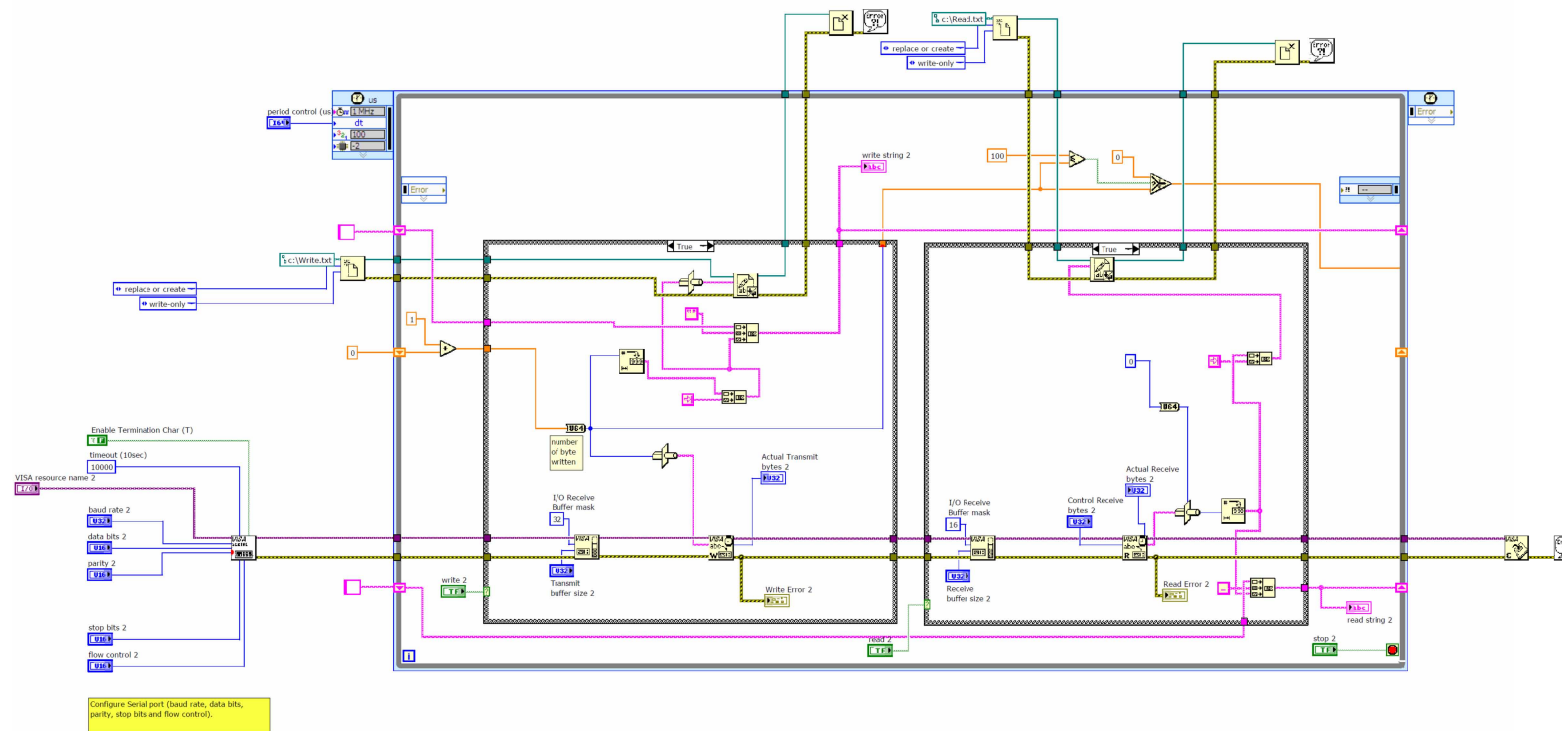
ภาพที่ ข-2 Tool box for block diagram

สำหรับงานวิจัยนี้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมี 3 โปรแกรม นั่นคือ โปรแกรมเพื่อการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232, โปรแกรมเพื่อการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP, และโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ HHIL รายละเอียดของโปรแกรม ดังแสดงต่อไปนี้

ข.1.1 โปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232

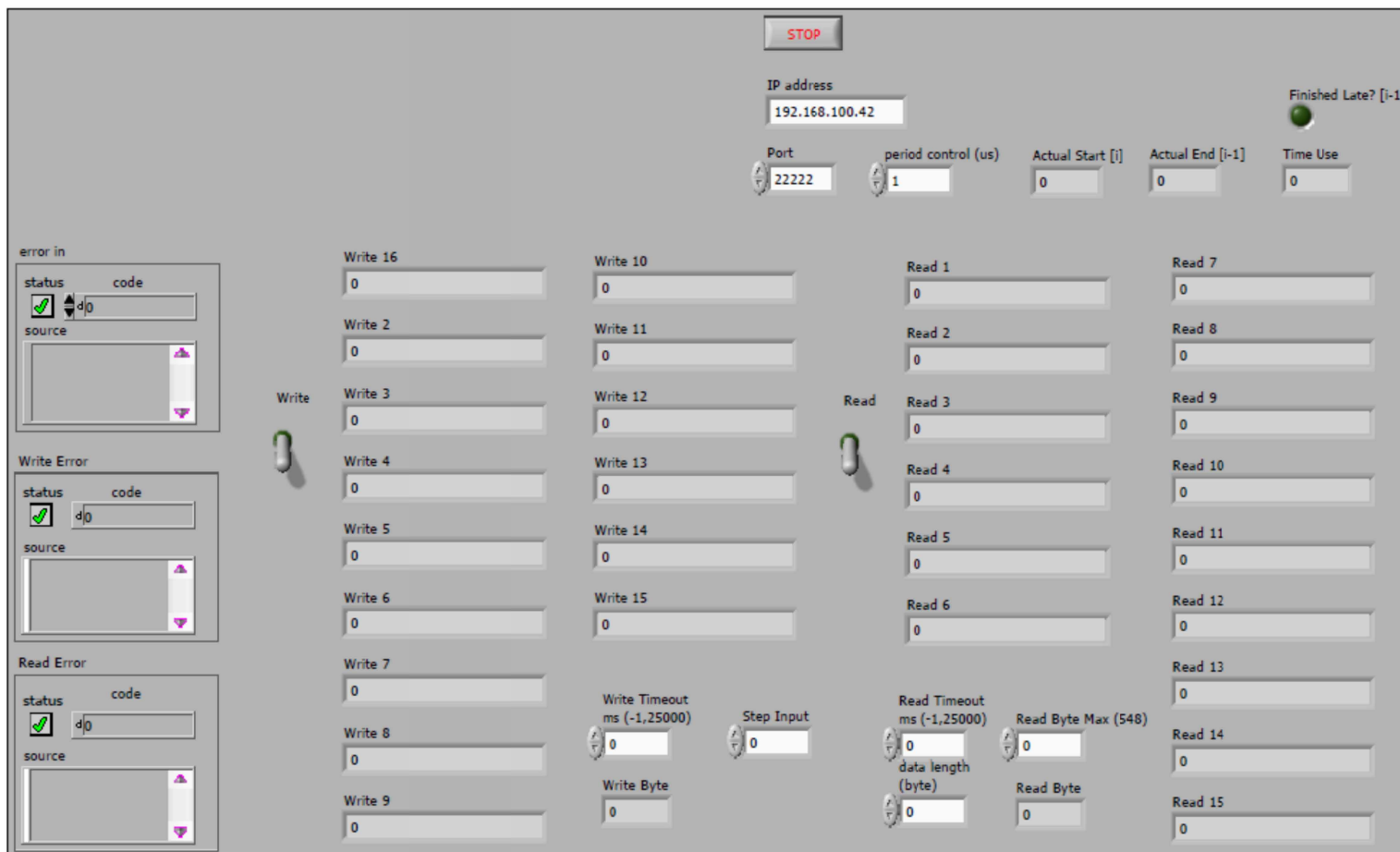


ภาพที่ ข-3 Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232

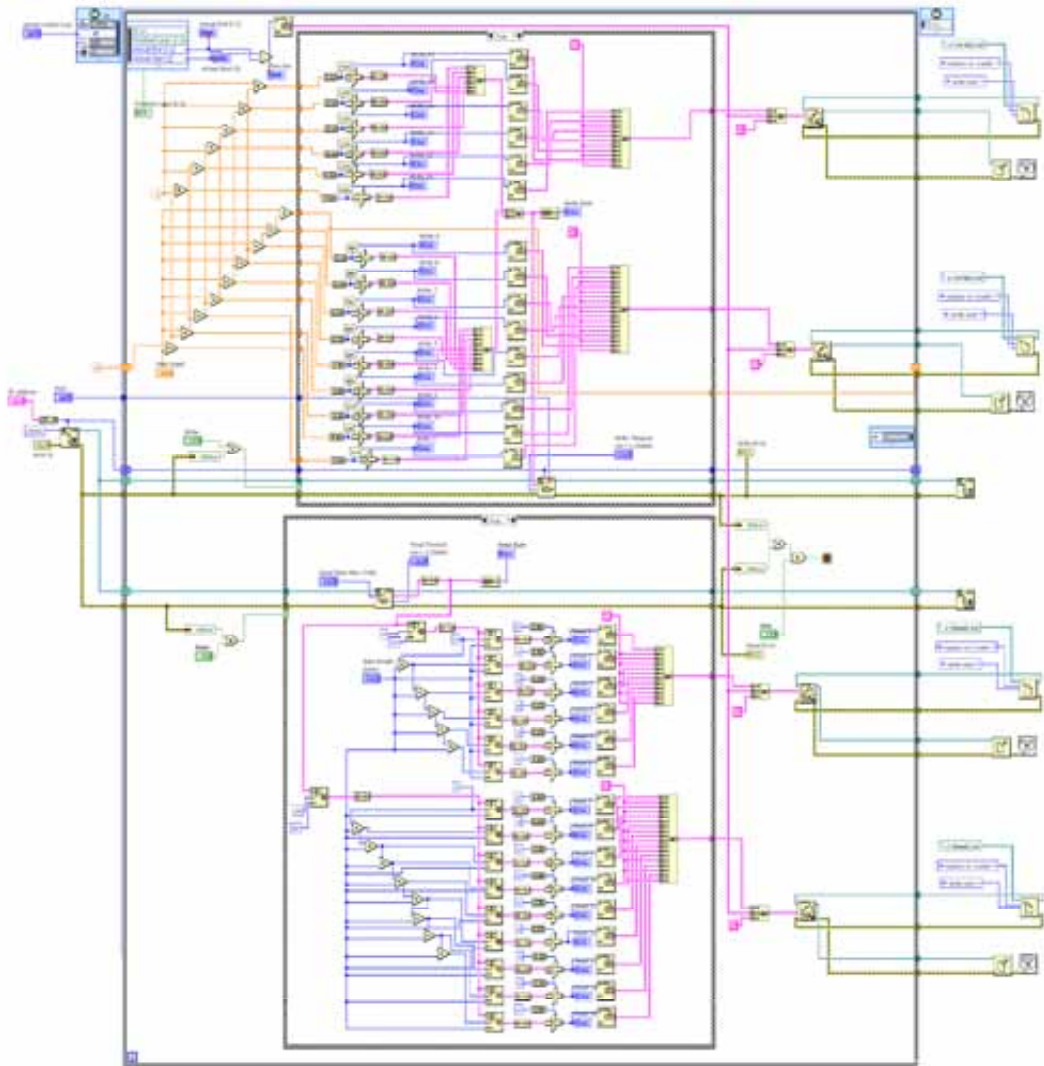


ภาพที่ ข-4 Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน RS232

ข.1.2 โปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP

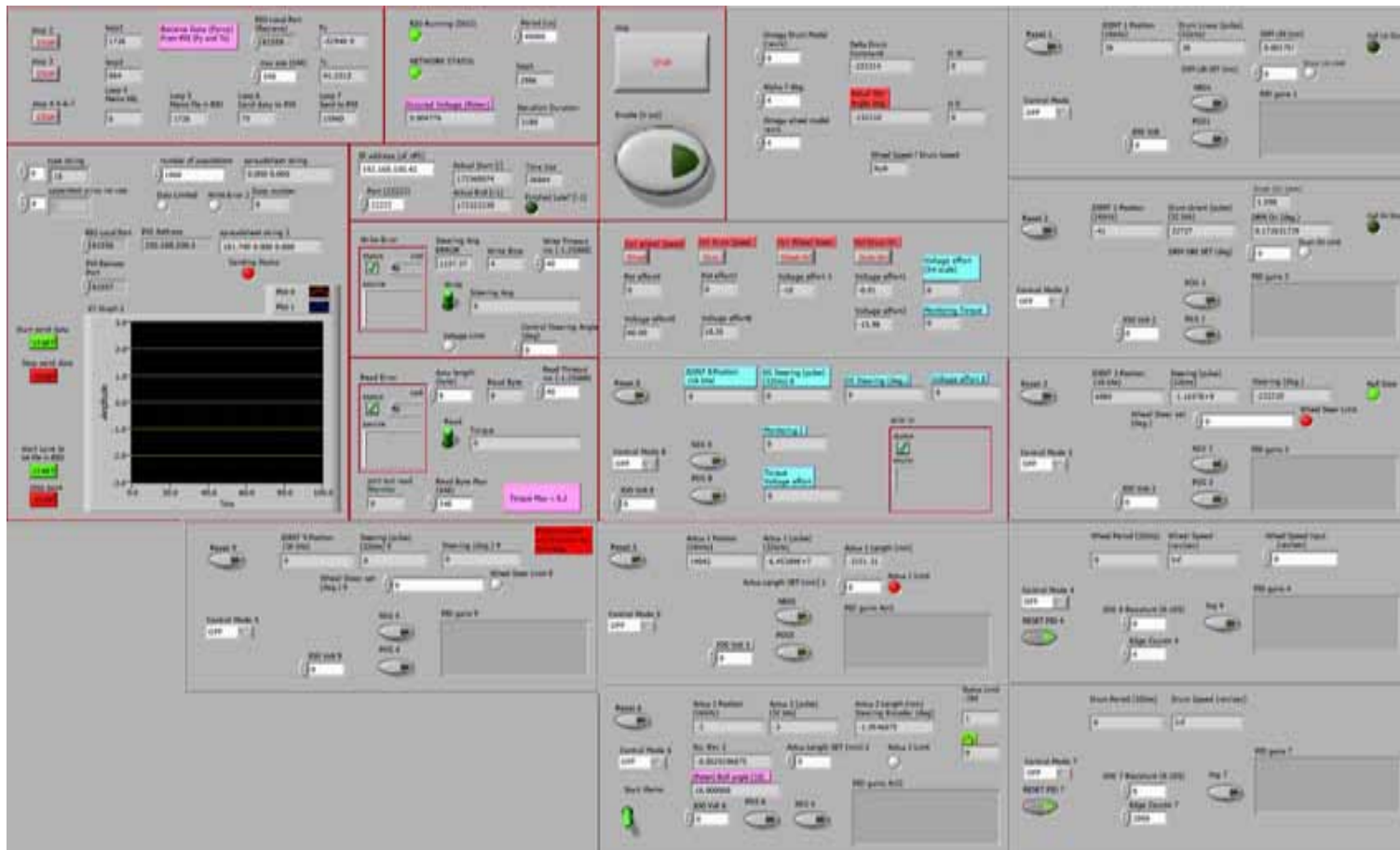


ภาพที่ ข-5 Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP

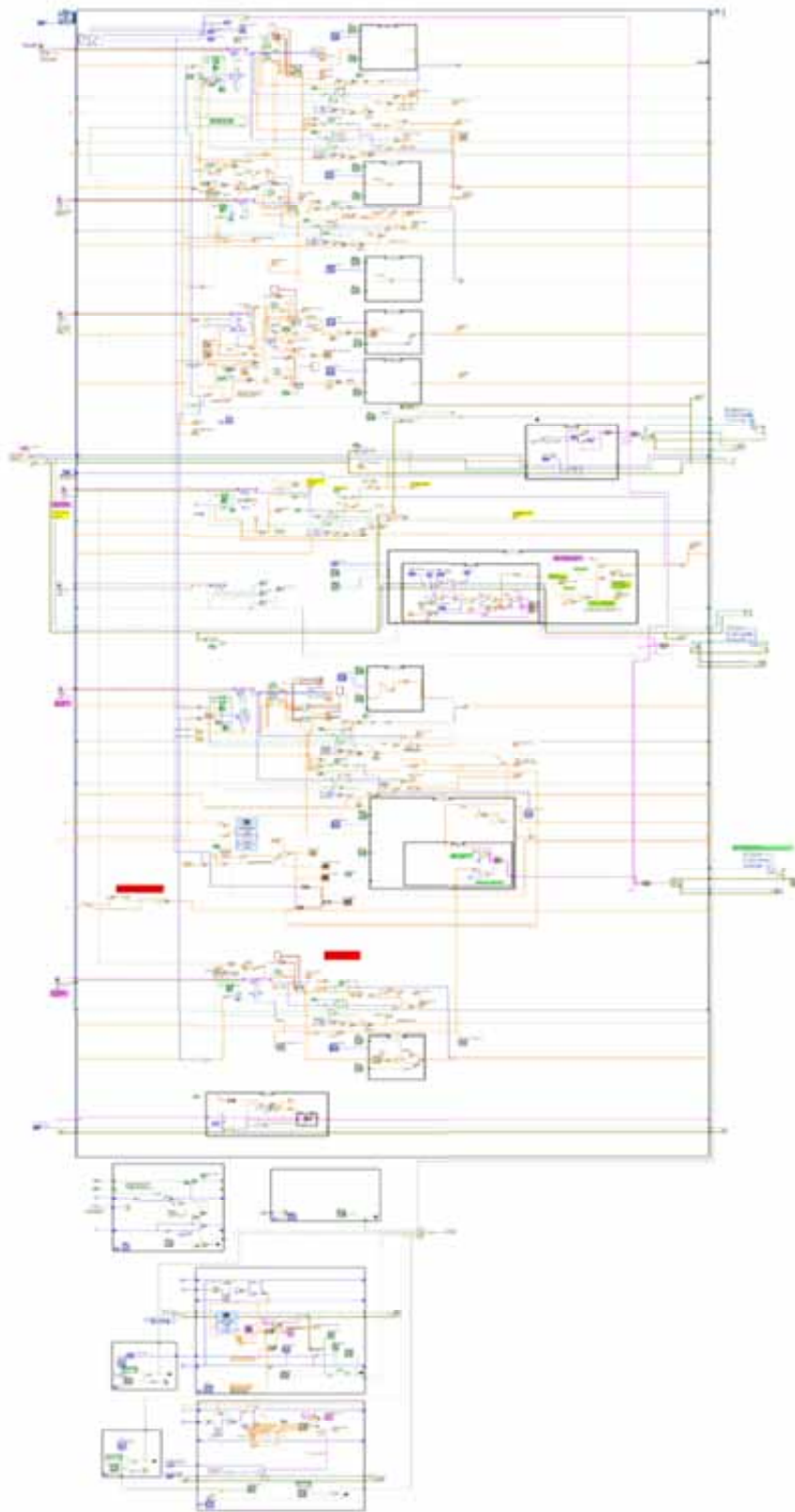


ภาพที่ ข-6 Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน TCP/UDP

ท. 1.3 โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานชุดทดสอบ HHIL



ภาพที่ ข-7 Front panel สำหรับโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานชุดทดสอบ HHIL



ภาพที่ ข-8 Block Diagram สำหรับโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานชุดทดสอบ HHIL

ข.2 NI PXI Controller



ภาพที่ ข-9 อุปกรณ์ประมวลผล NI PXI Controller

NI PXI Controller เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท National Instruments Corporation เช่นเดียวกับ NI CompactRIO ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดและระบบอัตโนมัติ NI PXI Controller ประกอบด้วยส่วนของโครงที่มี PCI-bus (Peripheral Component Interconnect) สำหรับรองรับ โมดูลช่องสื่อสารประเภทต่างๆ ที่สามารถประสานเวลาการทำงานได้ (synchronization bus) และ ส่วนของตัวควบคุม (Controller) ที่มีลักษณะคล้ายโมดูลหนึ่งสำหรับประกอบเข้ากับส่วนของโครง มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่นำไปใช้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบฝังตัว (Embedded Controller) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมแบบครบวงจร ที่ประกอบไปด้วย CPU, hard drive, memory ที่รองรับ OS ทั้ง Windows และ NI LabVIEW[®] แบบเวลาจริง (Real-Time) และช่องสื่อสารแบบมาตรฐาน เช่น Ethernet, video, serial, USB เป็นต้น รวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงไม่ ต้องมีคอมพิวเตอร์อีกเครื่องเพื่อการควบคุมเหมือนกับ NI CompactRIO ลักษณะของโครงและ โมดูลตัวควบคุม ดังแสดงในภาพที่ ข-10 และ ข-11

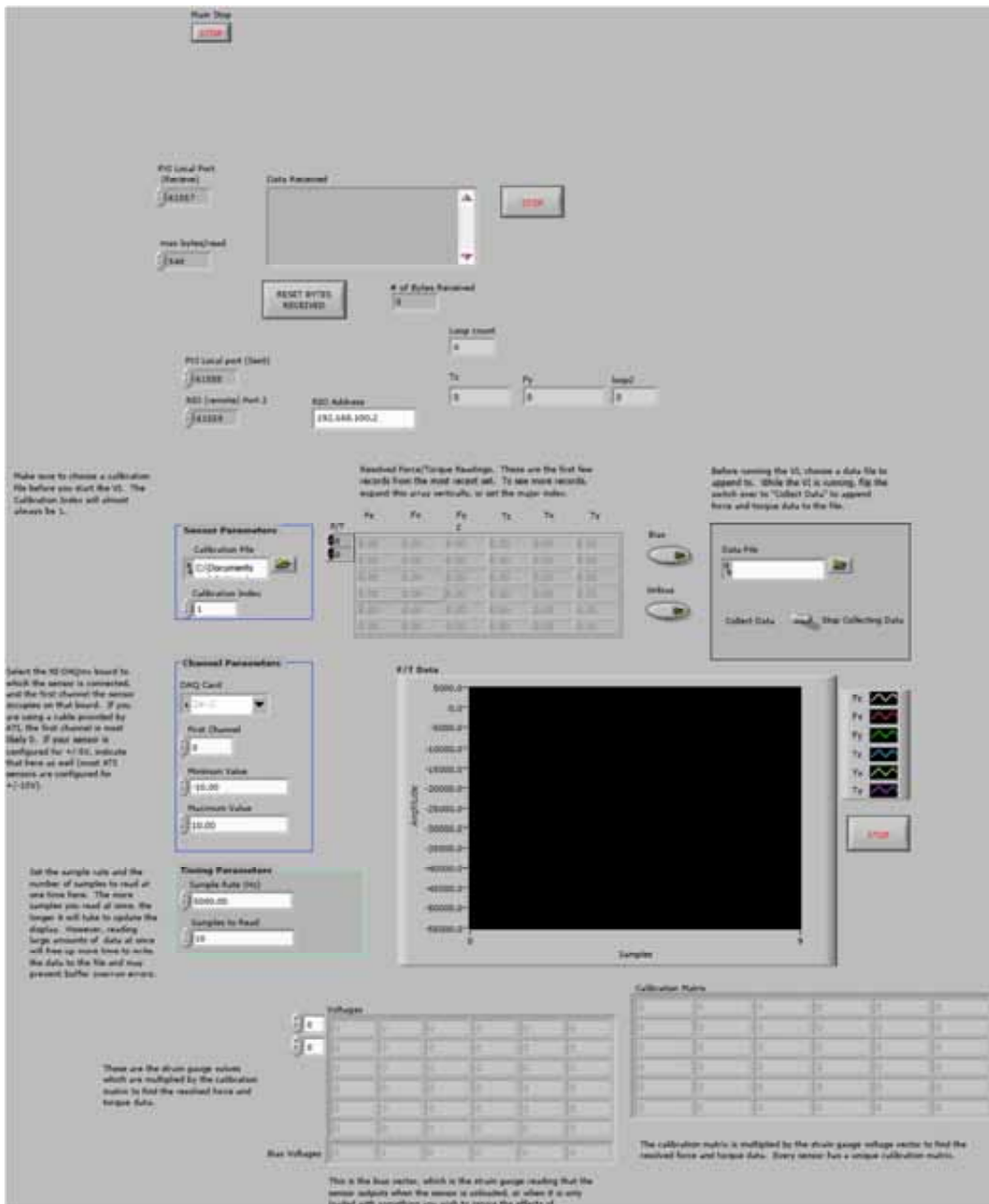


รูปที่ ข-10 NI PXI Chassis

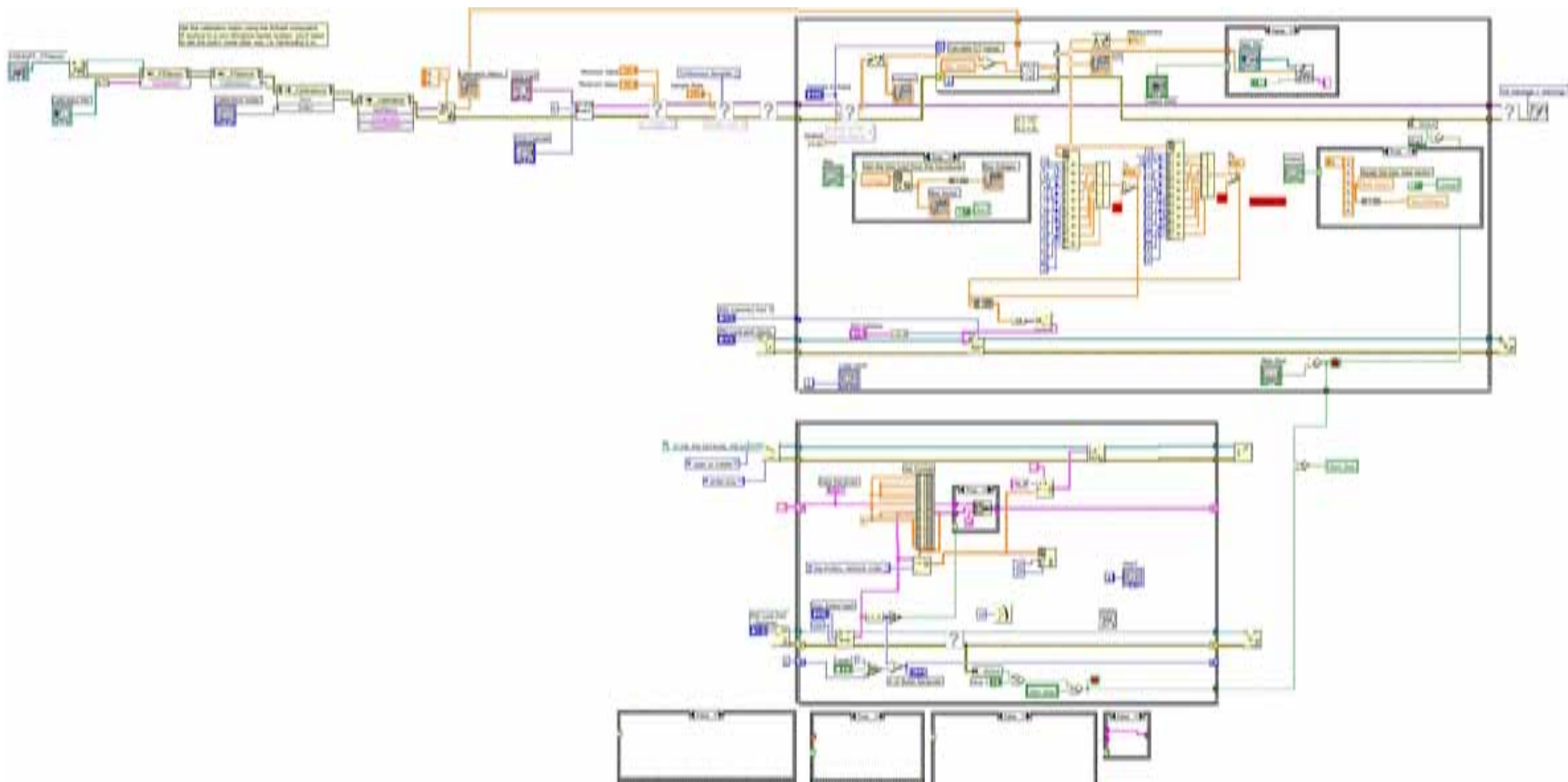


ภาพที่ ข-11 Embedded Controller

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ จะนำ NI PXI Controller มาใช้เพื่อวัดและสอบเทียบค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสนามของ บริษัท ATI Industrial Automation จึงเลือกใช้โปรแกรม NI LabVIEW® ที่มีความสอดคล้องกับโปรแกรมการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับสนาม ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ ข-12 และ ข-13



ภาพที่ ข-12 Front Panel สำหรับโปรแกรมที่ใช้สอบเทียบค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด



ภาพที่ ข-13 Block Diagram สำหรับโปรแกรมที่ใช้สอบเทียบค่าแรงและแรงบิดที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด

ข.3 คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง



ภาพที่ ข-14 คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง

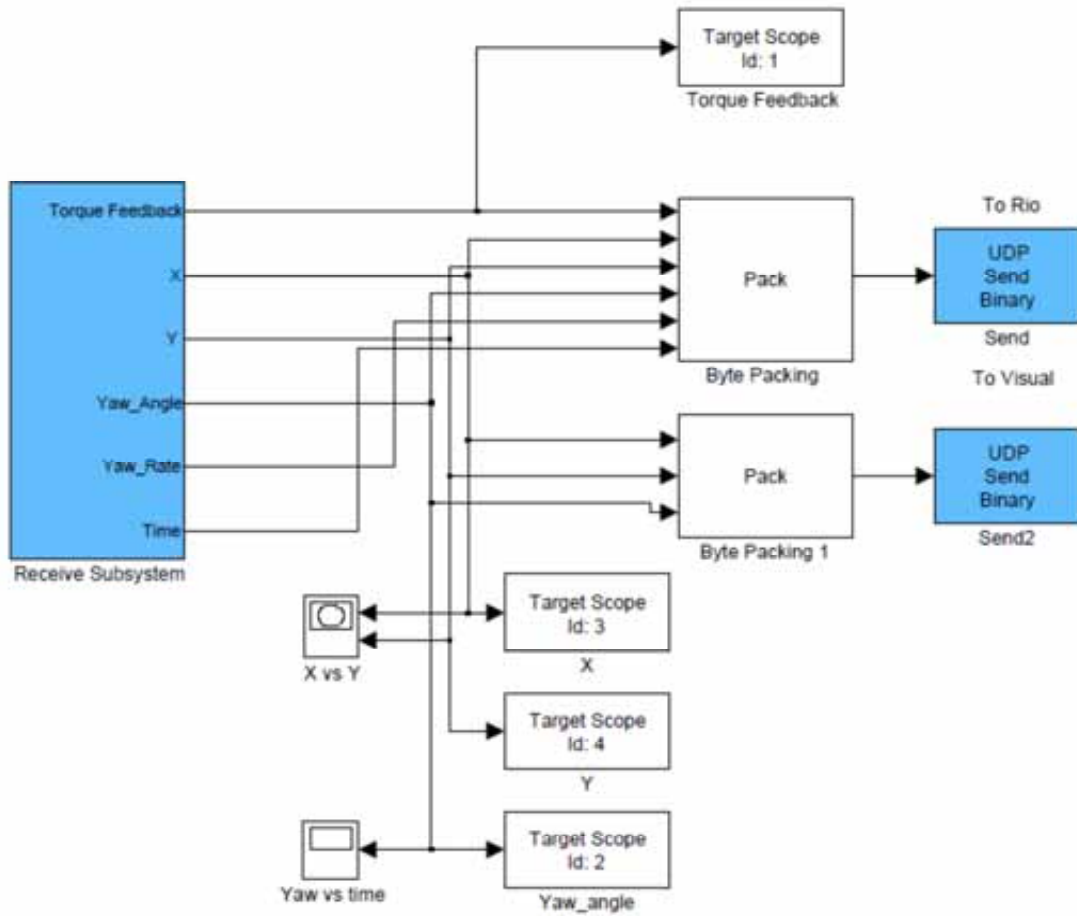
เนื่องจากการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการทำงานแบบเวลาจริงในงานอุตสาหกรรม และการทดสอบต่างๆทำได้ยาก ผู้ที่พัฒนาต้องมีความรู้ทางการเขียนโปรแกรมเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงเลือกใช้โปรแกรม MATLAB® Simulink ที่มีลักษณะเป็น block diagram สามารถทำความเข้าใจง่ายมาใช้ในงานวิจัยนี้ คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงเป็นการนำชุดคำสั่ง xPC ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม MATLAB® Simulink มาใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกคอมพิวเตอร์ เพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบน MATLAB® Simulink สามารถทำงานแบบเวลาจริงได้ การใช้ xPC จะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งทำหน้าที่เป็น Host การพัฒนาโปรแกรมตลอดจนการปรับปรุงแก้ไขต่างๆ สามารถกระทำผ่านเครื่องนี้ผ่านบนโปรแกรม MATLAB® Simulink อีกเครื่องหนึ่งทำหน้าที่เป็น Target ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลตามโปรแกรมที่ได้รับมาจากเครื่อง Host ด้วยตนเอง ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกการสั่งเริ่มทำงานและหยุดทำงานได้ 2 ทางทั้งผ่านทางเครื่อง Host และ Target ได้ยาก เครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันด้วยสายสื่อสารประเภท TCP/IP การสร้าง CD-boot, การ boot ผ่าน USB หรือการ boot ผ่านทางสาย TCP เป็นต้น

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานอุปกรณ์ภายนอกนั้น ช่องทางที่ใช้ขึ้นอยู่กับ Block diagram ที่โปรแกรมรองรับ และชนิดของ NIC (Network Interface Card) ที่นำมาติดตั้ง ซึ่งจะต้องเลือกใช้รุ่นการใช้งานที่เข้ากันได้ตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในโปรแกรม MATLAB® Simulink ในงานวิจัยนี้ ใช้ Intel® PRO/1000 GT Desktop Adapter chipset 8355x ดังแสดงในภาพที่ ข-15

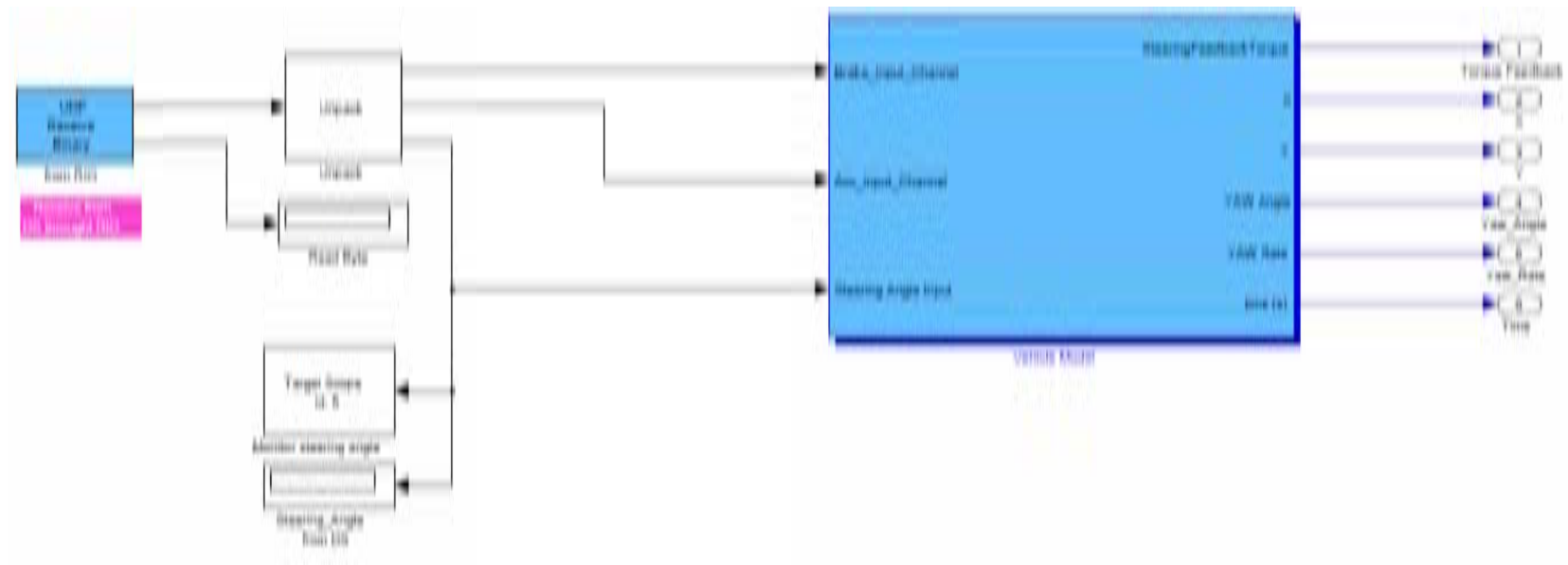


รูปที่ ข-15 Intel® PRO/1000 GT Desktop Adapter chipset 8355x

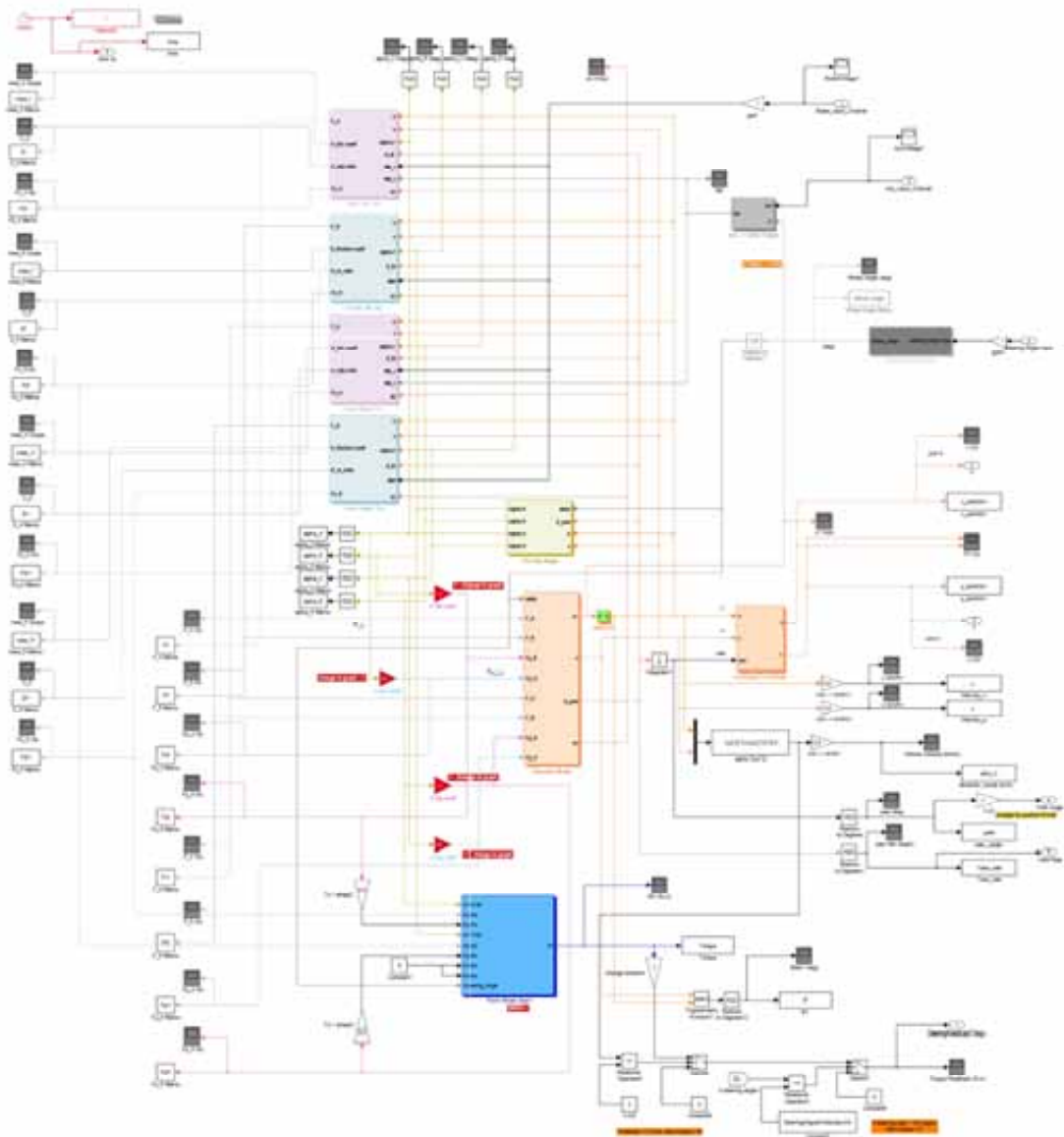
ในงานวิจัยนี้ ใช้คอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริงในการประมวลผลแบบจำลองยานยนต์ ซึ่งจะต้องรับสัญญาณเข้ามาจาก NI CompactRIO และส่งค่าให้กับคอมพิวเตอร์แสดงผลการขับที่ทางช่องสื่อสาร TCP ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ ข-16, ข-17 และ ข-18



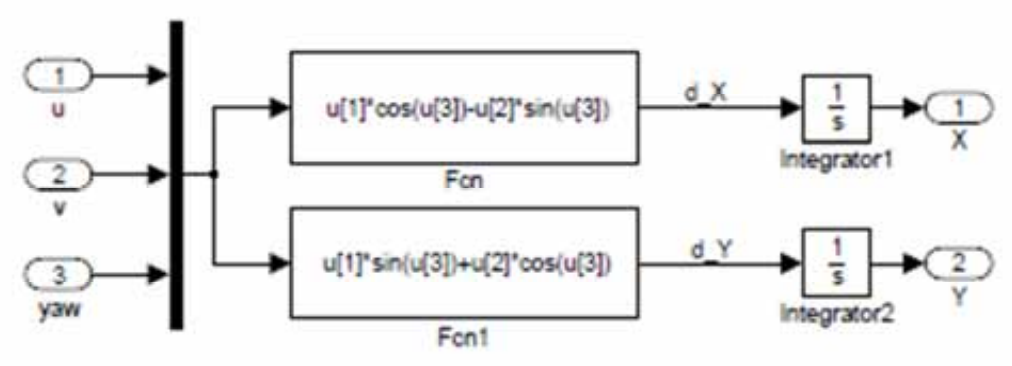
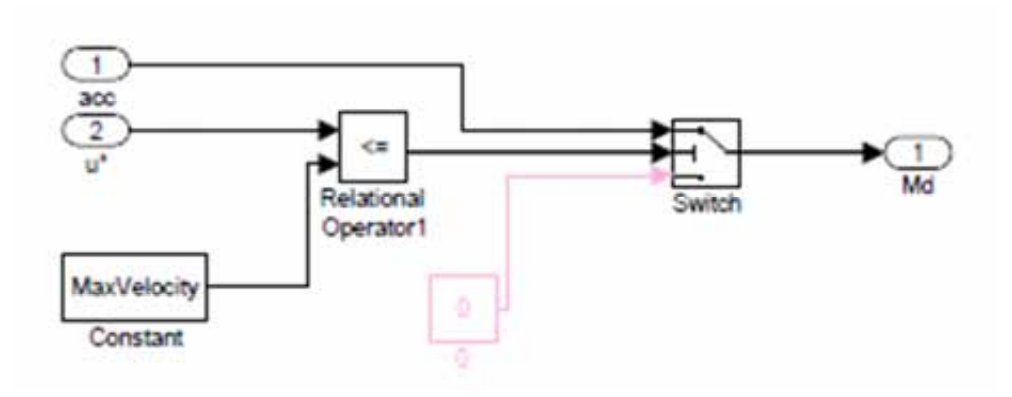
ภาพที่ ข-16 Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target



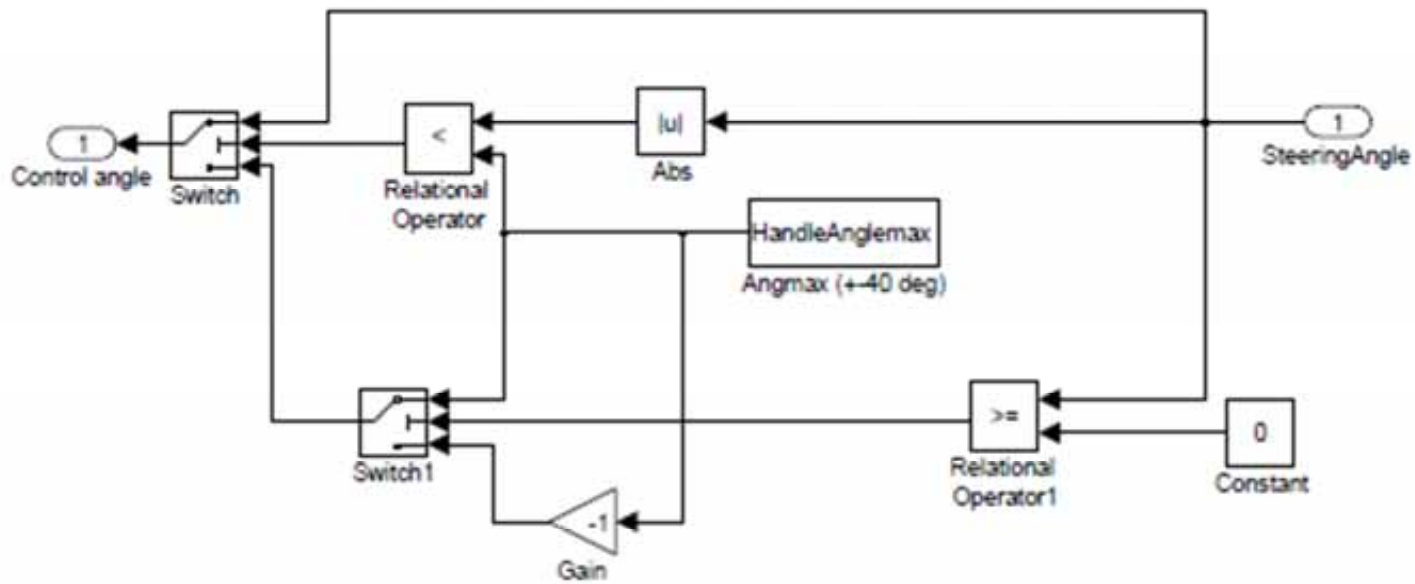
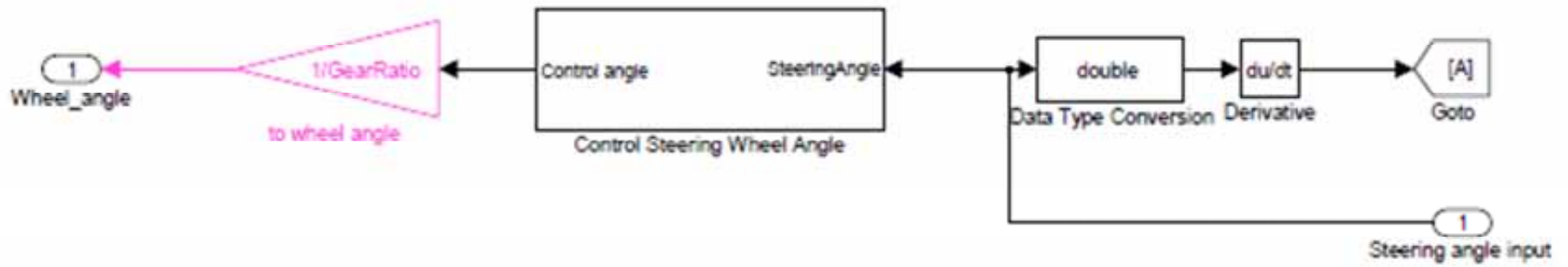
ภาพที่ ข-17 Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target ส่วนของ Receive Subsystem



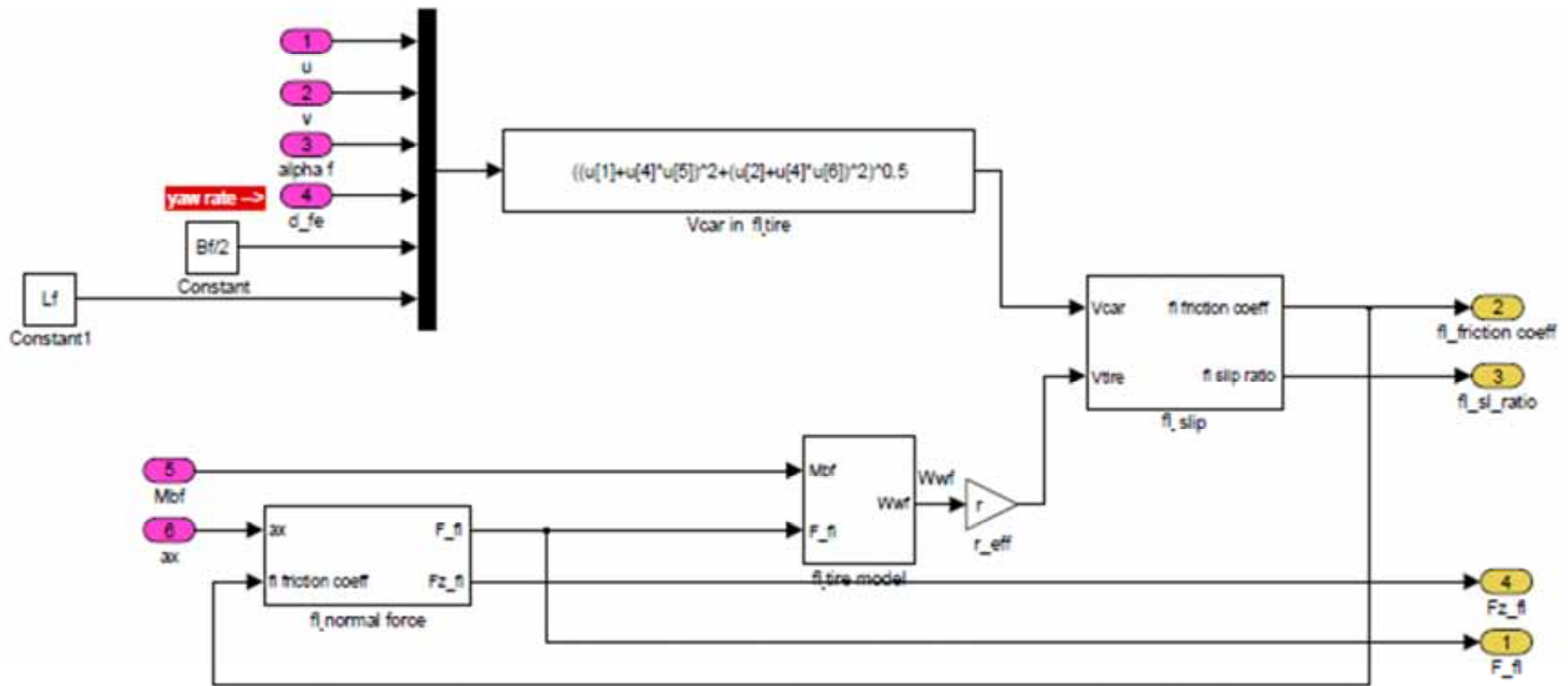
ภาพที่ ข-18 Block Diagram ของโปรแกรมบน xPC target ส่วนของ Vehicle Model



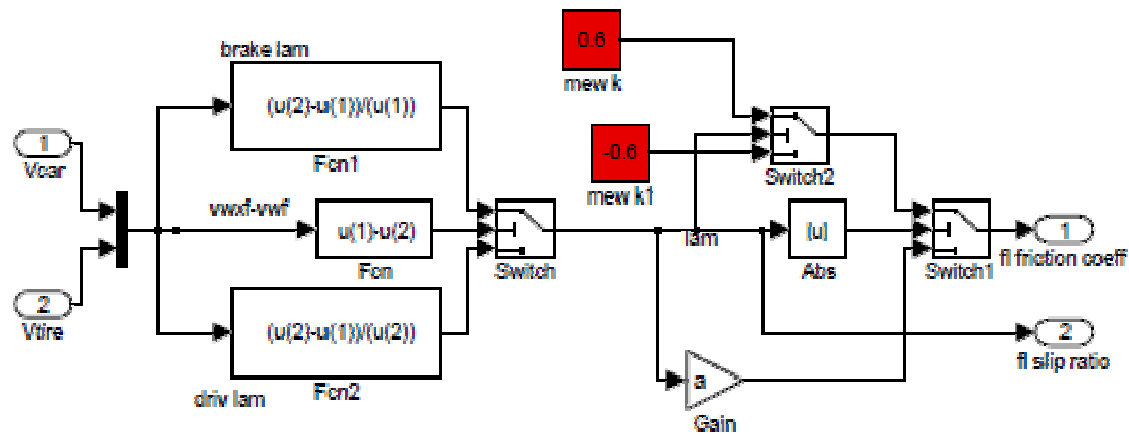
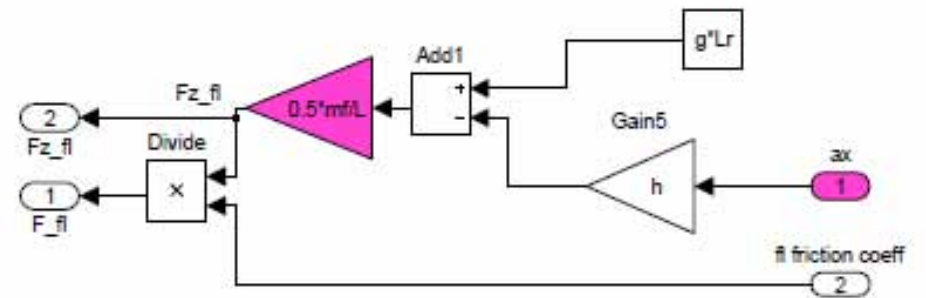
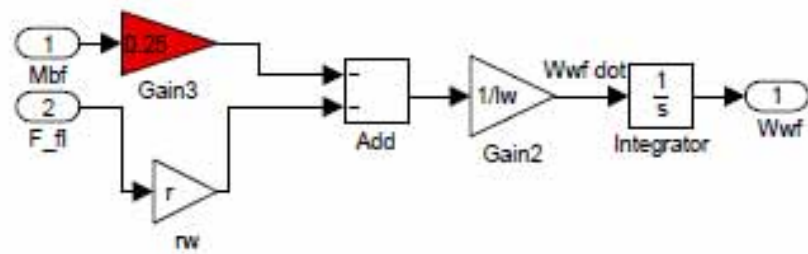
ภาพที่ ข-19 แบบจำลองแปลงความเร็วเป็นแรงบิดขับ และการแปลงตำแหน่งบนแกนอ้างอิงโลก



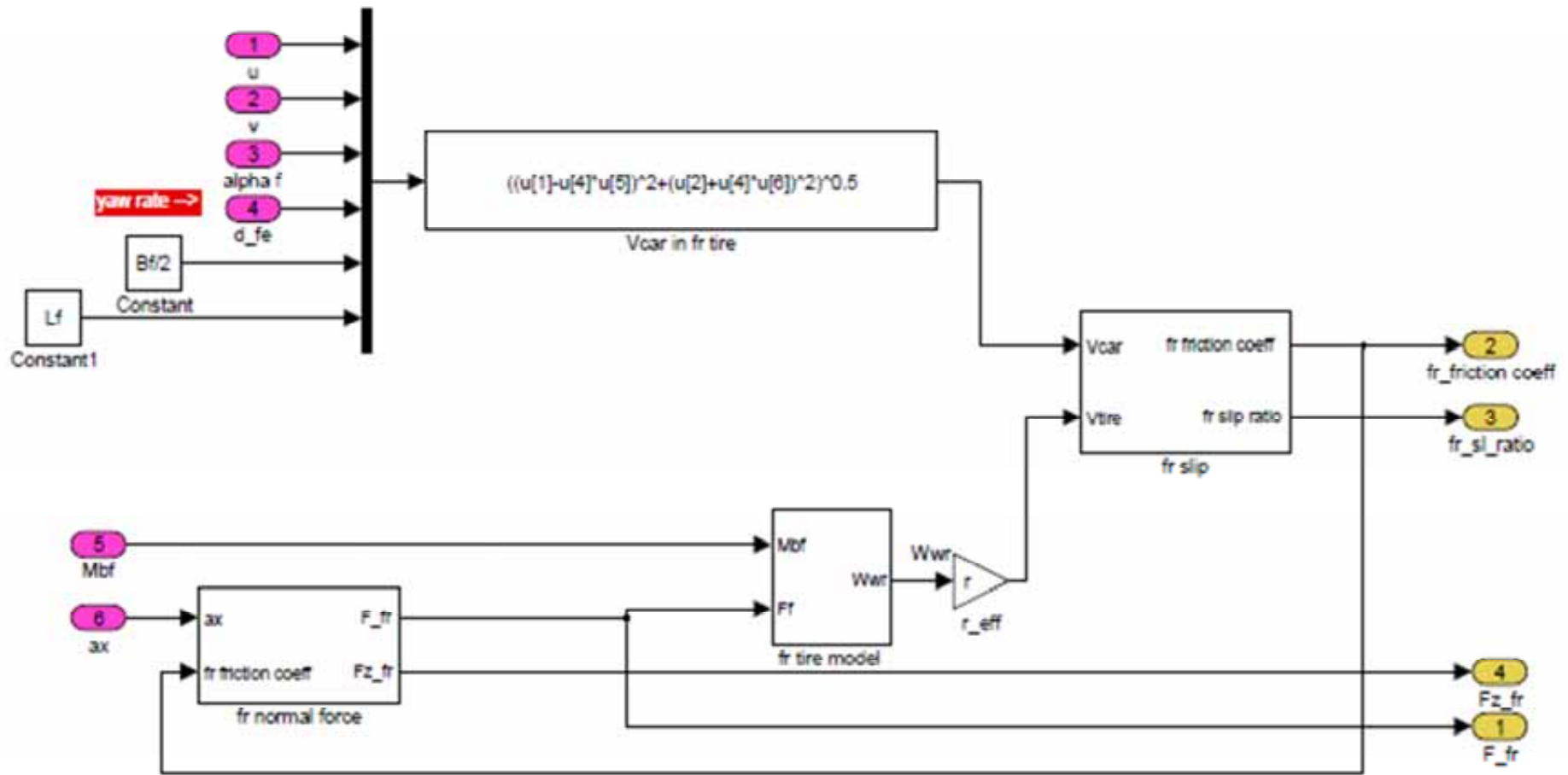
ภาพที่ ข-20 แบบจำลองการแปลงมุมเดี่ยวที่พวงมาลัยเป็นมุมเดี่ยวที่ล้อ



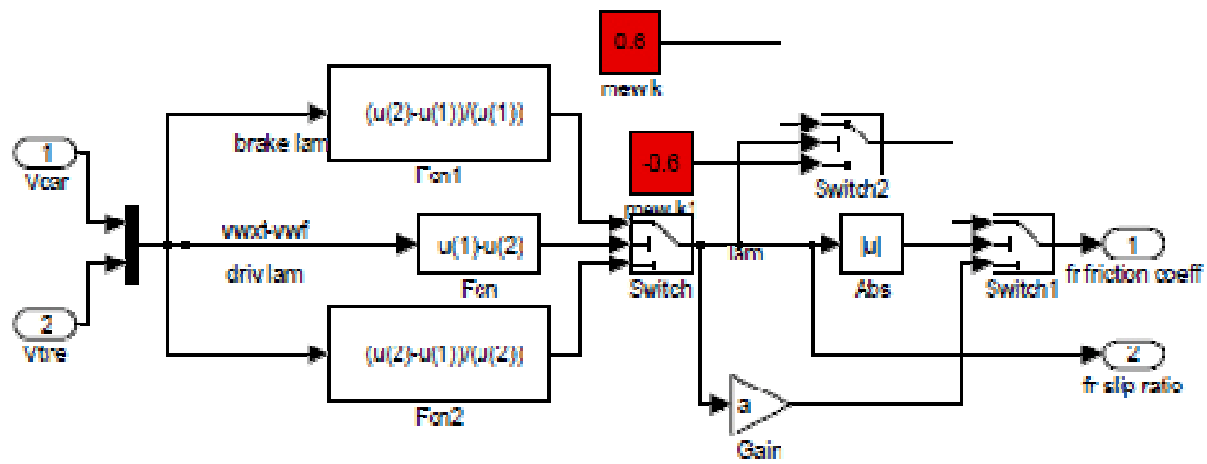
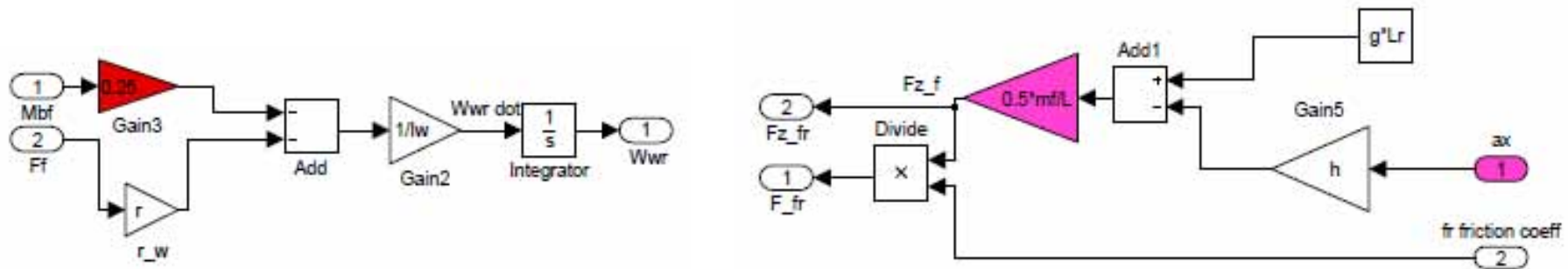
ภาพที่ ข-21 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าซ้าย



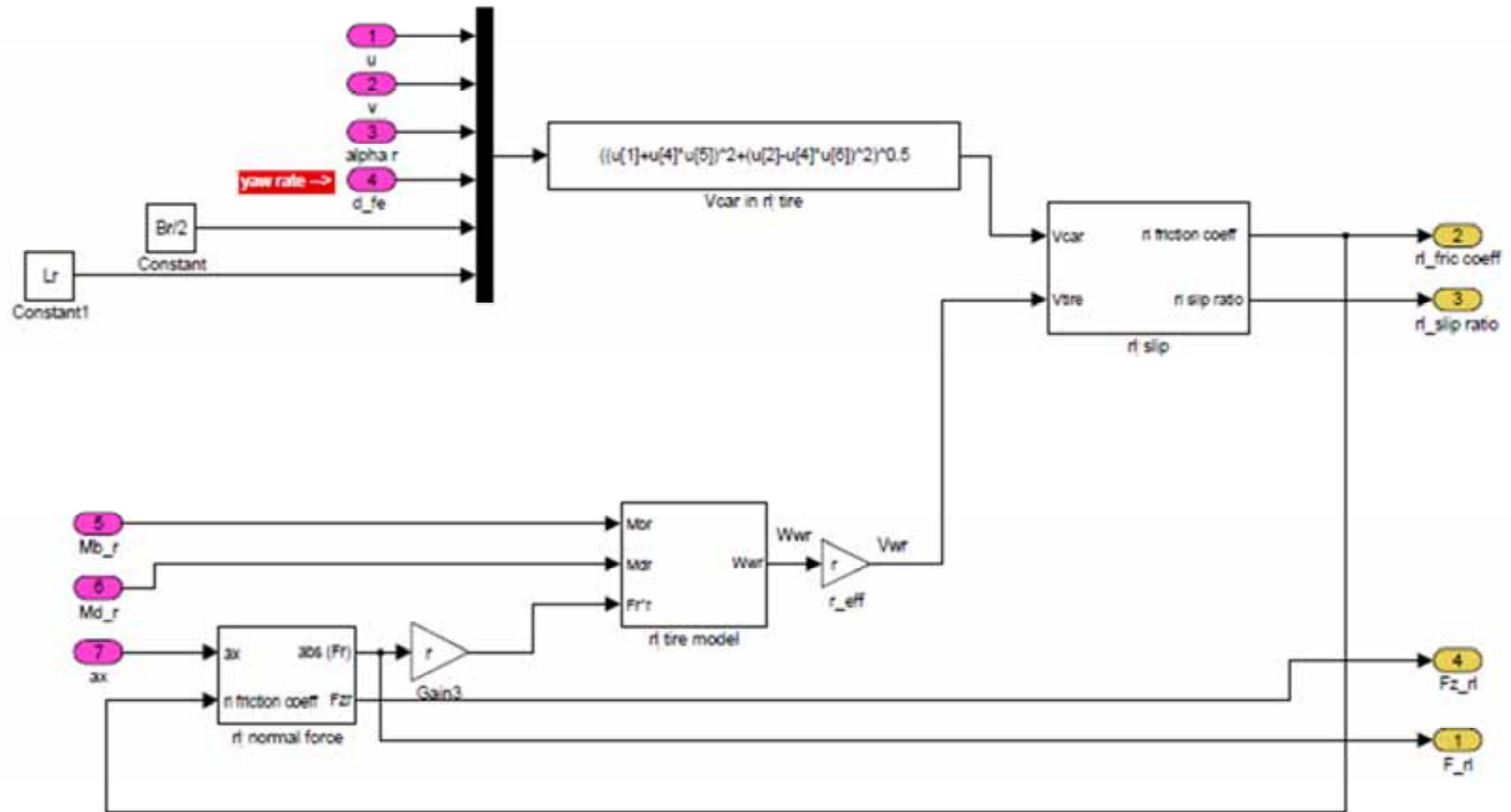
ภาพที่ ข-22 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าซ้าย (2)



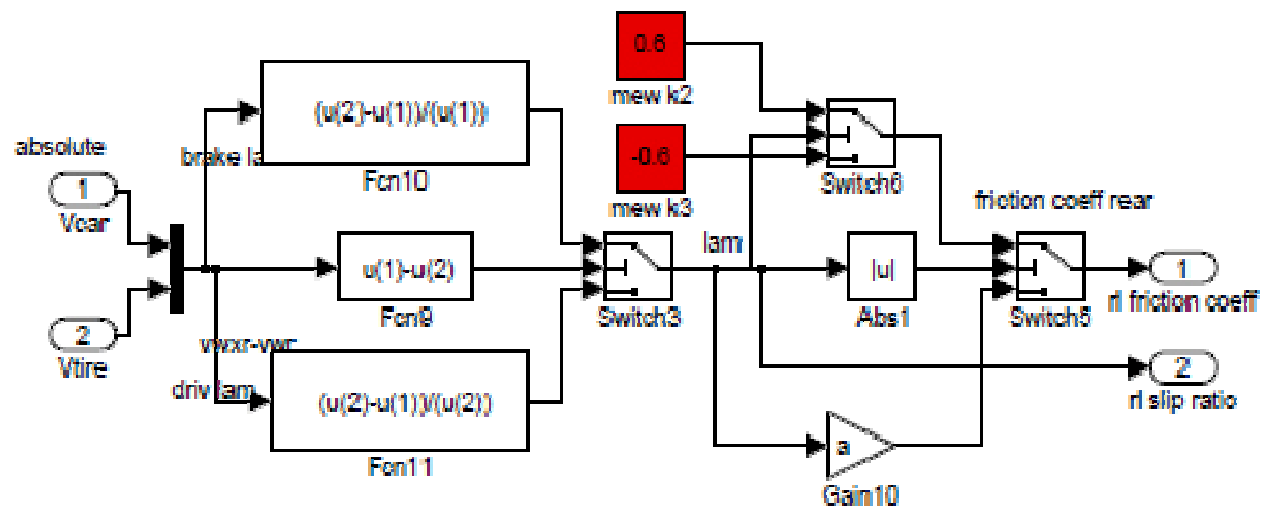
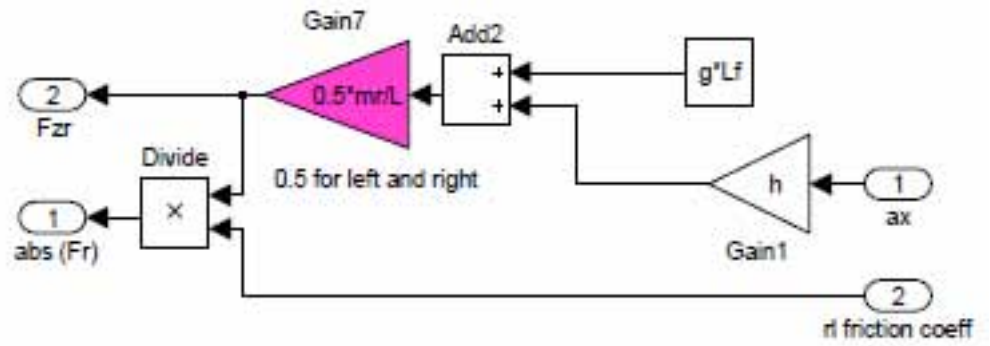
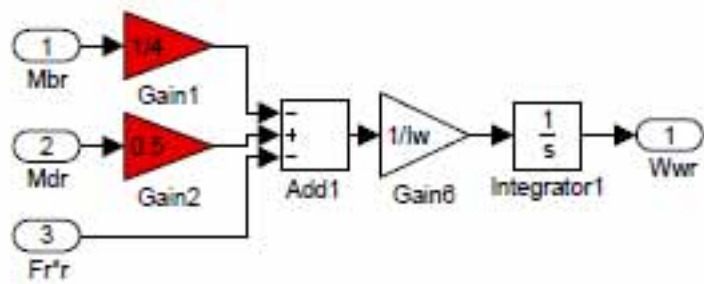
ภาพที่ ข-23 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าขวา



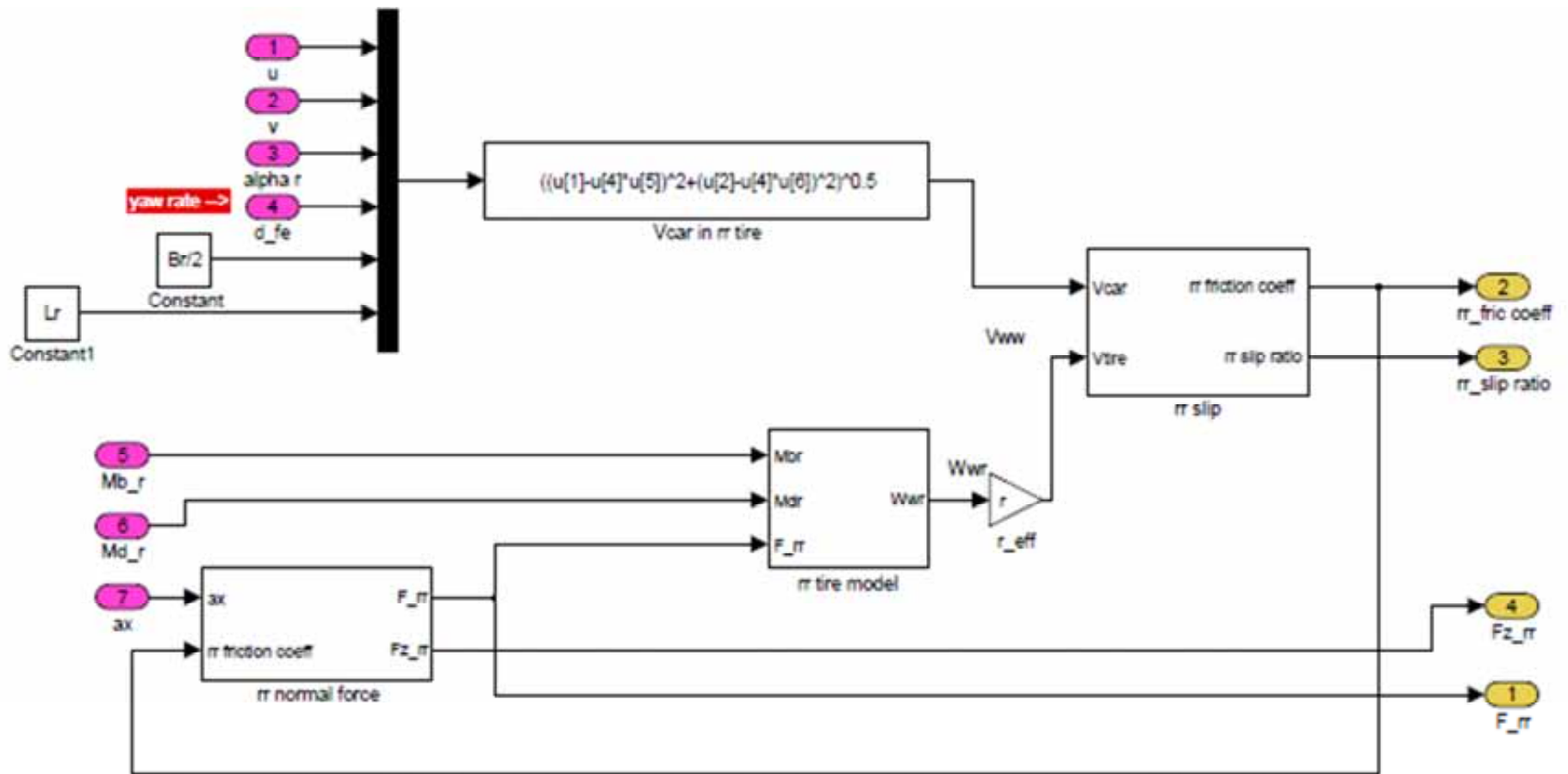
ภาพที่ ข-24 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหน้าขวา (2)



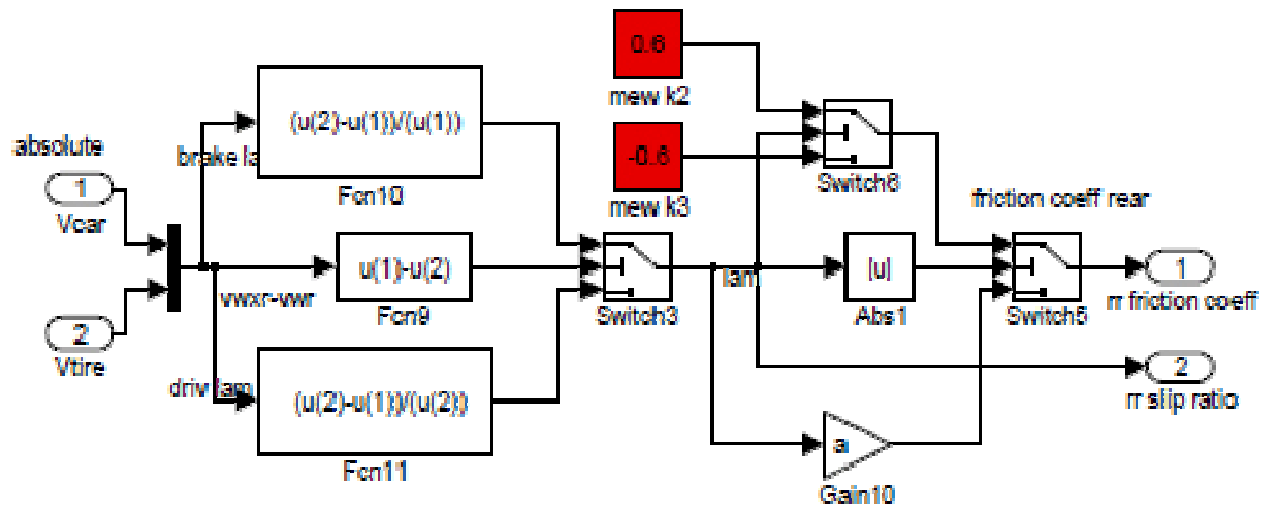
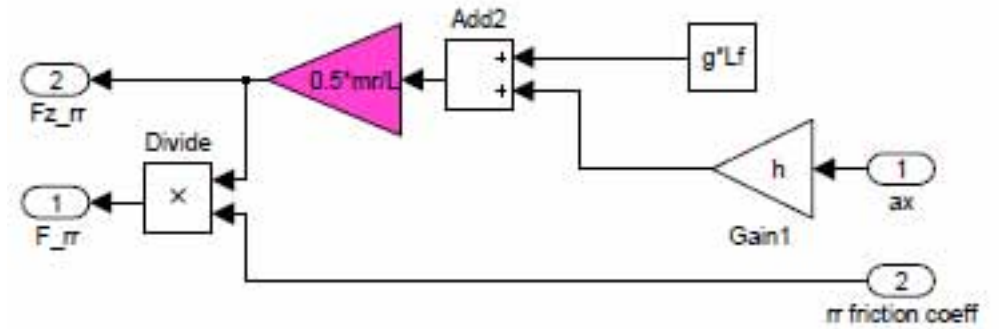
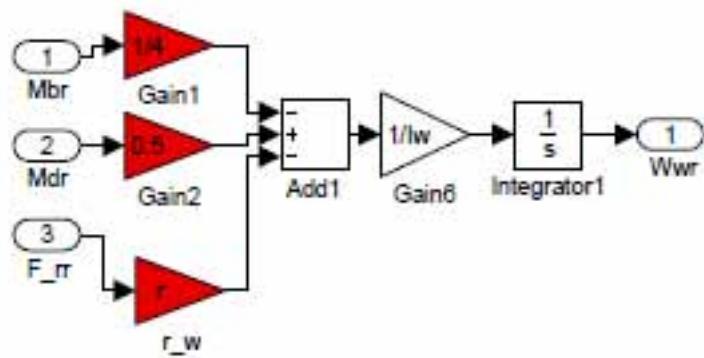
ภาพที่ ข-25 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังซ้าย



ภาพที่ ข-26 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังซ้าย (2)



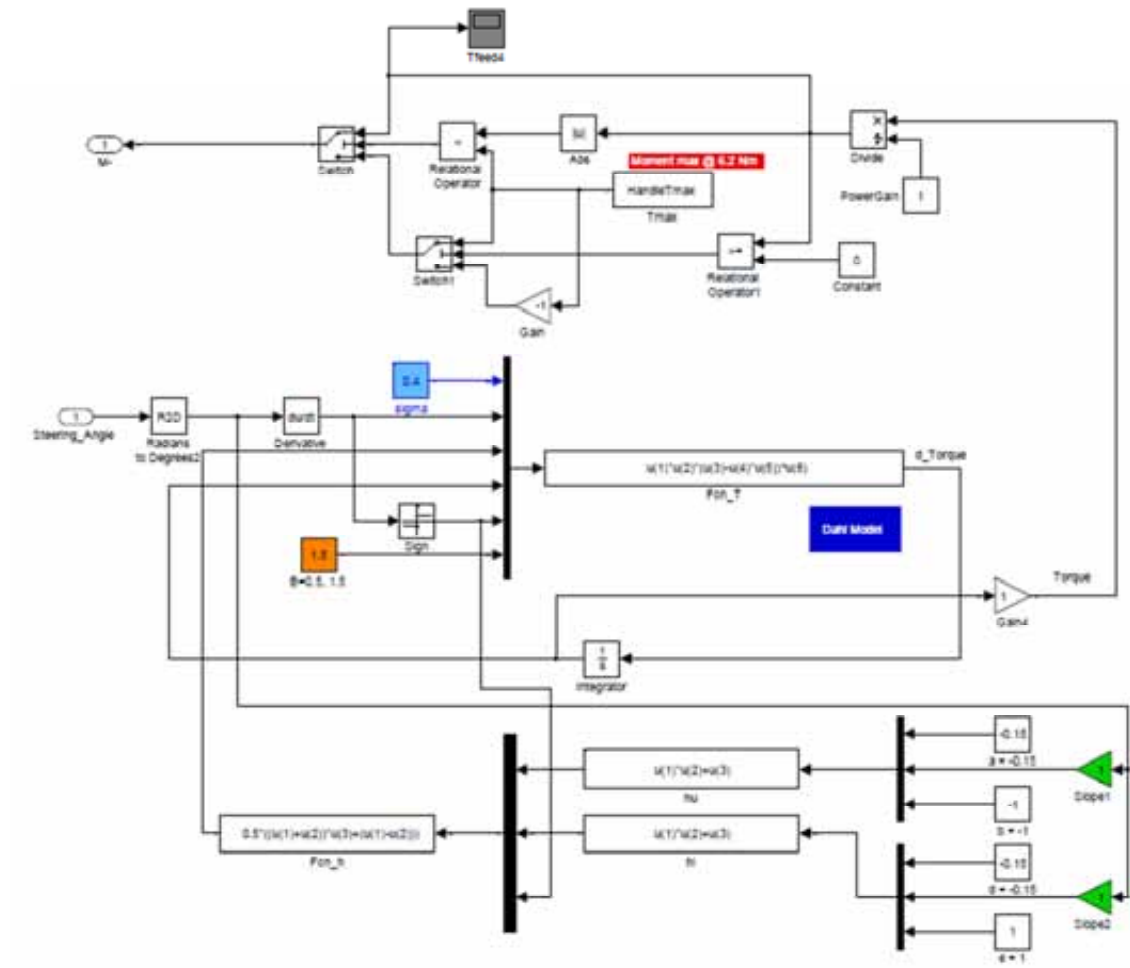
ภาพที่ ข-27 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังขวา



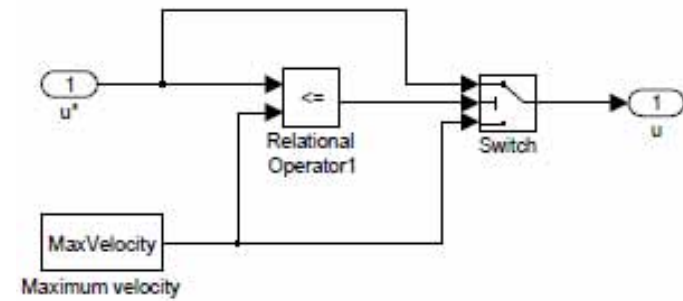
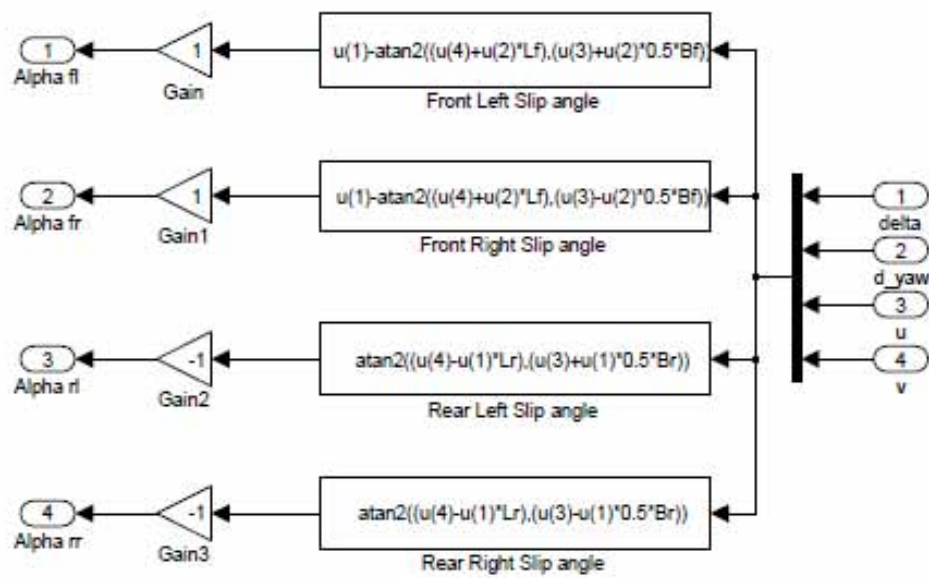
ภาพที่ ข-28 แบบจำลองพลศาสตร์ของล้อหลังขวา (2)



ภาพที่ ข-29 แบบจำลองพลศาสตร์



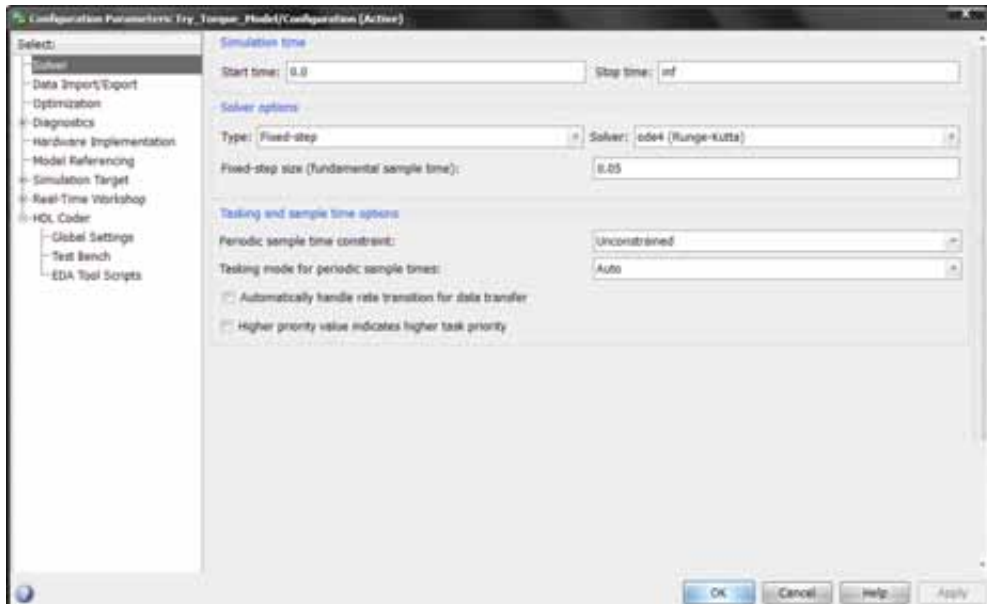
ภาพที่ ข-30 แบบจำลองแรงบิดด้วย Dahl model



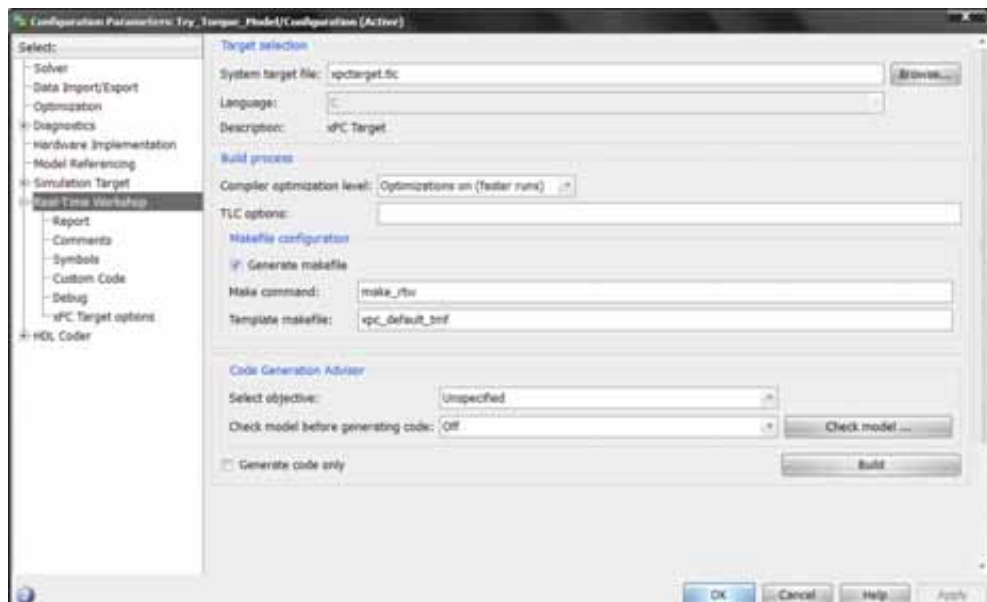
ภาพที่ ข-31 แบบจำลองมุมไถล และการจำกัดความเร็วสูงสุด

การตั้งค่าการประมวลผลของโปรแกรม Simulink

การตั้งค่าการประมวลผลของโปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของชุดทดสอบ HHIL แสดงได้ดังภาพที่ ข-32 และ ข-33

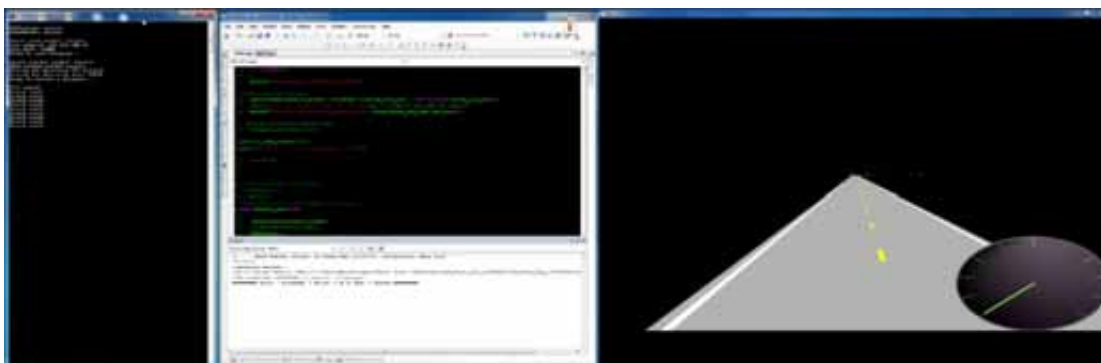


ภาพที่ ข-32 การตั้งค่าการประมวลผลของโปรแกรม Simulink



ภาพที่ ข-33 การสร้าง xPC target ที่ใช้ในการประมวลผลแบบจำลองยานยนต์แบบเวลาจริง

ข.4 คอมพิวเตอร์แสดงผลการขั้บซี่



ภาพที่ ข-34 คอมพิวเตอร์แสดงผลการขั้บซี่

ในส่วนของคอมพิวเตอร์แสดงผลการขั้บซี่นั้น พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio โดยใช้ภาษา C (C language) และ Open Graphics Library (OpenGL library) ซึ่งเป็นชุดของคำสั่งทางการสร้างภาพกราฟิกสามมิติ ตัวแอปพลิเคชันจะมีการเรียกใช้ในลักษณะของ API (Application Programming Interface) ผ่านทาง Compiler กับระบบปฏิบัติการเทคโนโลยี OpenGL ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท ซิลิกอนกราฟิก (Silicon Graphics International Corp.; SGI) เพื่อเป็นมาตรฐานสำหรับใช้งานแอปพลิเคชันสามมิติ โดยไม่ยึดติดกับระบบปฏิบัติการ (Platform) ใดๆ หรือที่เรียกว่าเทคโนโลยีแบบเปิด (open source) ด้วยเหตุผลทางด้านโครงสร้างในการโปรแกรมที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีความเสถียรของ OpenGL งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการพัฒนาการแสดงผลการขั้บซี่ โดยลักษณะของช่องทางการสื่อสารเป็นประเภท TCP ซึ่งเป็น Ethernet port มาตรฐานของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรมส่วนหนึ่ง ดังแสดงต่อไปนี้

```

// Vehicle Dynamics Lab, Mechanical Engineering
Department
// Engineering Faculty, Chulalongkorn University
// Create on: 2011/12/13, by Ratanapong C. - 5470344121

// Driving Simulator: Vehicle dynamics visualizer
// Description: The program visualize dynamics
information
//           calculated from H.I.L.S. The program
//           communicate with H.I.L.S by UDP protocol
// Note: The project should be compiled as C source code
//           Setting: Project properties>configuration
properties
//           c/c++>advanced>compile as>compile as c source
code

// Additional dependence libraries
#pragma comment (lib, "opengl32.lib")
#pragma comment (lib, "glut32.lib")
#pragma comment (lib, "glu32.lib")
#pragma comment (lib, "ws2_32.lib")

// Network header files
#include <winsock2.h>
#include <ws2tcpip.h> // To get address information

// Graphics header files
#include <GL/glut.h>

// Standard header files
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define GLUT_WIN_POS_X 50
#define GLUT_WIN_POS_Y 350
#define GLUT_WIN_SIZE_X 300
#define GLUT_WIN_SIZE_Y 300
#define GLUT_WINDOWS_NAME "DS Beta"
#define X_SIZE 0.5 // Object size in x
#define Y_SIZE 0.5 // Object size in y
#define X_MIN 0.0 // Windows min-x-coordinate
#define X_MAX 1.0 // Windows max-x-coordinate
#define Y_MIN 0.0 // Windows min-y-coordinate
#define Y_MAX 1.0 // Windows max-y-coordinate
#define X_DIFF 0.1 // Move distance in x
#define Y_DIFF 0.1 // Move distance in y

// Network constants
#define RECV_PORT 27015 // Receive port number
(**MAXIMUM IS 65535**)
#define SEND_PORT 27016 // Send port number
#define MAX_PORT_LEN 6 // Length of PORT (5+1 =
maxportlen+endOfString)
#define MAX_RECV_BUFF 40 // Maximum receive buffer size
#define MAX_SEND_BUFF 40 // Maximum send buffer size

```

```

#define MAIN_ARG_NUM 2 // Program's argument number
#define TIMEOUT_SEC 5 // Timeout in second to wait for
data from peer
#define TIMEOUT_MSEC 0 // Timeout in millisecond to wait
for data from peer

// Functions
int network_init(char *peer_ip);
void network_end(void);
void graphics_init(int *argc, char **argv);

// Graphics global variables
int main_window;

// Network global variable
SOCKET receive_socket = INVALID_SOCKET;
SOCKET send_socket = INVALID_SOCKET;
SOCKADDR_IN drive_sim_addr; // Driving-sim's info
SOCKADDR_IN drive_sim_send_info; // Driving-sim's send
info
SOCKADDR_IN receiver_addr; // Peer's info when
it's receiving
SOCKADDR_IN sender_addr; // Peer's info when it's
sending
int timing; // Timing result of timer
int drive_sim_addr_size = sizeof(drive_sim_addr);
int drive_sim_send_info_size =
sizeof(drive_sim_send_info);
int receiver_addr_size = sizeof(receiver_addr);
int sender_addr_size = sizeof(sender_addr);
char recv_buff[MAX_RECV_BUFF]; // Receive buffer
int recv_buff_size = MAX_RECV_BUFF;
char send_buff[MAX_SEND_BUFF] = "Message from Driving
simulator."; // Send buffer
int send_buff_size = MAX_SEND_BUFF;
int network_ready_status = 0; // Network ready flag

int main(int argc, char **argv)
{
    int result = 0;

    // Validate the parameters
    if(argc != MAIN_ARG_NUM)
    {
        printf("\nPLEASE INPUT SERVER ADDRESS\n");
        return 1;
    }

    // Network Init
    result = network_init(argv[1]);
    if(result != 0)
    {
        return 1;
    }
}

```



```

// Graphics Init
graphics_init(&argc, argv);

printf("Glut main loop start!\n\n");
glutMainLoop();

// Close connection
network_end();

return 0;
}

// Function name: network_init
// Parameters: peer_ip as pointer to character
// return: 0 - successful initialization
//         1 - fail initialization
int network_init(char *peer_ip)
{
    int result = 0;
    int recv_port = RECV_PORT;    // Receive port number
    int send_port = SEND_PORT;    // Send port number
    char port_char[MAX_PORT_LEN]; // Port number in
string
    struct addrinfo hints; // Address setting
    struct addrinfo *resultInfo = NULL; // Store
address setting

    WSADATA wsa_data; // Winsock startup parameter

// Initialize Winsock
    result = WSASStartup(MAKEWORD(2,2), &wsa_data);
    if(result != 0)
    {
        printf("\nWSASStartup failed with error: %d\n",
result);
        return 1;
    }
    printf("\nWSASStartup: success\n");

// Protocol and IP setting
    ZeroMemory(&hints, sizeof(hints));
    //hints.ai_family = AF_INET; // use when obtain ip
auto from router
    hints.ai_family = AF_NETBIOS; // use when set ip
manually
    hints.ai_socktype = SOCK_DGRAM; // Datagram
type
    hints.ai_protocol = IPPROTO_UDP; // UDP protocol
    hints.ai_flags = AI_PASSIVE;
    _itoa_s(recv_port, port_char, MAX_PORT_LEN, 10); //
10 for decimal number output

// Get address information on this machine.
// Save in "resultInfo"

```

```

        result = getaddrinfo(NULL, port_char, &hints,
&resultInfo);
        if(result != 0)
        {
            printf("getaddrinfo failed with error: %d\n",
result);
            freeaddrinfo(resultInfo);
            WSACleanup();
            return 1;
        }
        printf("getaddrinfo success\n\n");

// Create socket to SEND datagram
send_socket =
socket(AF_INET, SOCK_DGRAM, IPPROTO_UDP);
if(send_socket == INVALID_SOCKET)
{
    printf("send_socket failed with error: %ld\n",
WSAGetLastError());
    freeaddrinfo(resultInfo);
    WSACleanup();
    return 1;
}
printf("Create send_socket: success\n");

// Setup send_socket
//receiver_addr.sin_family = AF_INET; // use when
obtain ip auto from router
receiver_addr.sin_family = AF_NETBIOS; // use when
set ip manually
receiver_addr.sin_port = htons(send_port); // Port
setup
receiver_addr.sin_addr.s_addr = inet_addr(peer_ip);
// Peer's IP
printf("Peer address: %s\n",
inet_ntoa(receiver_addr.sin_addr));
printf("Peer port: %d\n",
htons(receiver_addr.sin_port));
printf("Ready to send datagram...\n\n");

// Send info memory allocation
memset(&drive_sim_send_info, 0,
drive_sim_send_info_size);

// Create socket to RECEIVE datagram
receive_socket = socket(resultInfo->ai_family,
resultInfo->ai_socktype,
resultInfo->ai_protocol);
if(receive_socket == INVALID_SOCKET)
{
    printf("receive_socket failed with error:
%d\n", WSAGetLastError());
    freeaddrinfo(resultInfo);
    closesocket(send_socket);
    WSACleanup();
}

```

```

        return 1;
    }
    printf("Create receive_socket: success\n");

// Setup and bind the receive_socket
// Setup driving sim address info
drive_sim_addr.sin_family = AF_INET;
drive_sim_addr.sin_port = htons(recv_port);
drive_sim_addr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
// Bind receive_socket
result = bind(receive_socket, (SOCKADDR
*) &drive_sim_addr, drive_sim_addr_size);
if(result == SOCKET_ERROR)
{
    printf("Bind receive_socket failed with error:
%d\n", WSAGetLastError());
    freeaddrinfo(resultInfo);
    closesocket(receive_socket);
    closesocket(send_socket);
    WSACleanup();
    return 1;
}
printf("Bind receive_socket success\n");

// Show Driving Sim info
getsockname(receive_socket, (SOCKADDR
*) &drive_sim_addr, (int *) sizeof(drive_sim_addr));
printf("Driving Sim Receiving IP: %s\n",
inet_ntoa(drive_sim_addr.sin_addr));
printf("Driving Sim Receiving port: %d\n",
htons(drive_sim_addr.sin_port));

// Finish using this address info
freeaddrinfo(resultInfo);

network_ready_status = 1;
printf("Ready to receive a datagram...\n\n");

    return 0;
}

// Function name: network_end
// Parameters: -
// return: -
void network_end(void)
{
    closesocket(receive_socket);
    closesocket(send_socket);
    WSACleanup();
    printf("\nConnection closed\n");
}
// Function name: graphics_init
// Parameters: argc, argv
// return: -

```

```
void graphics_init(int *argc, char **argv)
{
    printf("OpenGL initializing...\n");
    glutInit(argc, argv);
    glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGB);
    glutInitWindowPosition(          GLUT_WIN_POS_X,
GLUT_WIN_POS_Y);
    glutInitWindowSize(              GLUT_WIN_SIZE_X,
GLUT_WIN_SIZE_Y);
    main_window = glutCreateWindow(GLUT_WINDOWS_NAME);
    printf("          Windows position:  %d,  %d\n",
GLUT_WIN_POS_X, GLUT_WIN_POS_Y);
    printf("          Windows size:      %d,  %d\n",
GLUT_WIN_SIZE_X, GLUT_WIN_SIZE_Y);
    printf("          Windows name: %s\n", GLUT_WINDOWS_NAME);

    glClearColor(0.0, 0.0, 0.0, 0.0);
    glMatrixMode(GL_PROJECTION);
    glLoadIdentity();
    glOrtho(X_MIN, X_MAX, Y_MIN, Y_MAX, -1.0, 1.0);

    //glutDisplayFunc(glut_display); // Display callback
registration
    //glutIdleFunc(glut_idle);      // Idle callback
registration
}
```

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดสอบ

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดสอบ

ตารางที่ ค-1 จะแสดงลักษณะการบันทึกผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์เมื่อผู้ทดสอบขับขึ้นเครื่องจำลองการขับขี่ที่เป็นส่วนหนึ่งของชุดทดสอบ HHIL โดยใช้แบบจำลองยานยนต์ที่ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ทำงานแบบเวลาจริง โดยรูปแบบการบันทึกผลจะบันทึกผลทางพลศาสตร์ผ่านทางคอมพิวเตอร์ทำงานเวลาจริง ผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการแสดงผลทางการขับขี่จะบันทึกที่ NI CompactRIO และค่าแรงและแรงบิดจริงที่ตรวจวัดได้จะบันทึกค่าที่ NI PXI Controller โดยทุกครั้งที่มีการบันทึกผล NI CompactRIO จะมีการส่งค่าของเวลาที่ทำงาน ณ เวลานั้น ให้กับอุปกรณ์อื่นๆ ตลอดเวลาที่ทำกรทดสอบ

ตารางที่ ค-1 ลักษณะการบันทึกผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์เมื่อผู้ทดสอบขับโดยใช้ชุดทดสอบ HHIL

Time (μ s)	Steering Angle	Torque	X	Y	Yaw Angle	Tz	Fy
0	0	0.0000	20.0000	0.0000	0.0000	0	0
49883	0	0.0000	20.8300	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
148436	0	0.0000	21.6700	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
248386	0	0.0000	22.5000	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
348388	-1	0.0000	23.3300	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
448380	-1	0.0000	24.1700	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
548385	-1	0.0000	25.0000	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
648392	-1	0.0000	25.8300	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
748381	-1	0.0000	26.6700	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
848389	-2	0.1577	27.5000	0.0000	0.0000	4.12E+01	-5.30E+04
948381	-2	0.1258	28.3300	-0.0001	0.0025	4.12E+01	-5.30E+04
1048397	-2	0.1153	29.1700	-0.0003	0.0096	4.12E+01	-5.30E+04
1148378	-2	0.1214	30.0000	-0.0005	0.0200	4.12E+01	-5.30E+04
1248399	-3	0.1509	30.8300	-0.0009	0.0276	4.12E+01	-5.30E+04
1348383	-3	0.3639	31.6700	-0.0014	0.0061	4.12E+01	-5.30E+04

1448382	-3	0.2564	32.5000	-0.0023	-0.0660	4.12E+01	-5.30E+04
1548379	-3	0.0515	33.3300	-0.0035	-0.1658	4.12E+01	-5.30E+04
1648388	-4	-0.0193	34.1700	-0.0044	-0.2442	4.12E+01	-5.30E+04
1748383	-4	-0.0413	35.0000	-0.0045	-0.2760	4.12E+01	-5.30E+04
1848393	-4	0.0641	35.8300	-0.0037	-0.2698	4.12E+01	-5.30E+04
1948372	-5	-0.0868	36.6700	-0.0022	-0.2347	4.12E+01	-5.30E+04
2048382	-5	0.3342	37.5000	-0.0002	-0.1804	4.12E+01	-5.30E+04
2148412	-5	0.4296	38.3300	0.0020	-0.1128	4.12E+01	-5.30E+04
2248385	-5	0.5266	39.1700	0.0040	-0.0359	4.12E+01	-5.30E+04
2348392	-5	0.6112	40.0000	0.0055	0.0449	4.12E+01	-5.30E+04
2448388	-5	0.8210	40.8300	0.0063	0.1259	4.12E+01	-5.30E+04
2548398	-6	0.8370	41.6700	0.0062	0.2073	4.12E+01	-5.30E+04
2648392	-6	0.8562	42.5000	0.0051	0.2904	4.12E+01	-5.30E+04
2748389	-6	0.8749	43.3300	0.0029	0.3742	4.12E+01	-5.30E+04
2848379	-6	0.8912	44.1700	-0.0004	0.4578	4.12E+01	-5.30E+04
2948371	-6	1.0486	45.0000	-0.0048	0.5408	4.12E+01	-5.30E+04
3048378	-6	1.0294	45.8300	-0.0104	0.6254	4.12E+01	-5.30E+04
3148371	-6	1.0295	46.6700	-0.0173	0.7139	4.12E+01	-5.30E+04

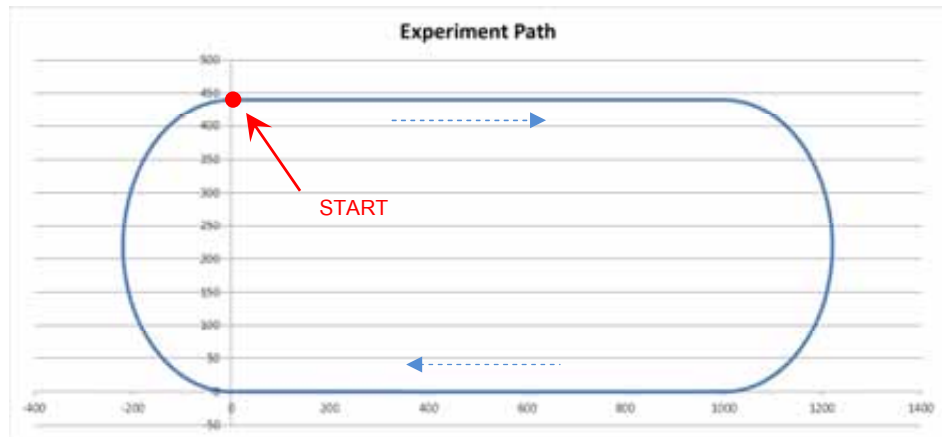
ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการซ้ำชี

ภาคผนวก ง.

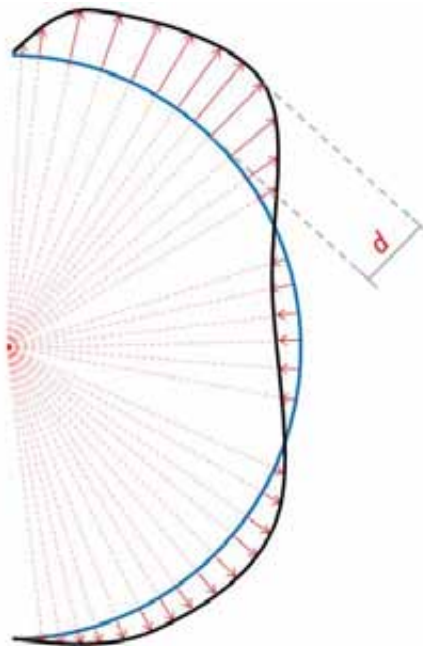
การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการขับขี่

พิจารณาในช่วงของการเลี้ยวโค้ง ที่รัศมีความโค้ง 220 เมตร โดยนำผลที่บันทึกได้จากการขับขี่มาเปรียบเทียบกับเส้นทางการขับขี่จริง ดังแสดงในภาพที่ ง-1



ภาพที่ ง-1 เส้นทางการขับขี่ที่กำหนดเพื่อการทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฟฟ้า

ซึ่งจะเปรียบเทียบหาค่าความผิดพลาด โดยพิจารณาเป็นระยะห่างน้อยที่สุดที่วัดจากจุดศูนย์กลางการเลี้ยวโค้ง ดังแสดงในภาพที่ ง-2 ซึ่งคำนวณจากสมการ (ง-1)



ภาพที่ ง-2 ลักษณะการหาค่าความผิดพลาดจากการขับขี่

$$d_i = \begin{cases} R - \sqrt{(X - 1000)^2 + (Y - 220)^2} \\ R - \sqrt{(X - 0)^2 + (Y - 220)^2} \end{cases} \quad (\text{ง-1})$$

เมื่อ R คือรัศมีความโค้งของเส้นทางที่ขั้วชี้ ในงานวิจัยนี้ $R = 220$ เมตร, X และ Y เป็นค่าตำแหน่งที่บันทึกได้ขณะขั้วชี้ ซึ่งจะใช้สมการด้านบนเมื่อเป็นการเลี้ยวครั้งที่เลขคี่ และเปรียบเทียบกับสมการด้านล่างเมื่อเป็นการเลี้ยวครั้งที่เลขคู่

การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการขั้วชี้ พิจารณาจากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (d_i) ในแต่ละครั้งของการบันทึกข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (ง-2)

$$Er = \sum_{i=1}^n |d_i| \quad (\text{ง-2})$$

เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูลที่บันทึกได้ ซึ่งมีประมาณ 830 ข้อมูลต่อการเลี้ยวโค้งหนึ่งครั้ง จากนั้นพิจารณาค่าความผิดพลาดดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยต่อการบันทึกข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (ง-3)

$$Er_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (\text{ง-3})$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าความผิดพลาดในการขั้วชี้ ดังแสดงในตารางที่ ง-1 และ ง-2

ตารางที่ ง-1 ลักษณะการคำนวณค่าความผิดพลาดในการขับชั่งเมื่อแบบจำลองแรงบิดใช้ค่า

$\beta=0.5$ ในการเลี้ยวครั้งที่ 7 จากการเลี้ยว 14 ครั้ง (หน่วย: เซนติเมตร)

i	X_test	Y_test	d
1	1000.08	0.55	0.55
2	1001.03	0.57	0.56
3	1001.98	0.58	0.57
4	1002.93	0.60	0.58
5	1003.88	0.62	0.58
6	1004.83	0.64	0.59
7	1005.79	0.66	0.58
...			
415	1213.27	219.41	6.73
416	1214.77	220.25	5.23
417	1215.60	221.08	4.40
418	1216.42	221.91	3.57
419	1217.24	222.74	2.74
420	1218.06	223.57	1.91
421	1218.88	224.40	1.08
422	1219.69	225.23	0.25
...			
818	1004.79	435.42	4.53
819	1003.87	435.44	4.53
820	1002.94	435.46	4.52
821	1002.01	435.47	4.52
822	1001.09	435.48	4.52
823	1000.16	435.49	4.51
<i>Er</i>			2354.44
<i>Er_avg</i>			2.861

ตารางที่ ง-2 ลักษณะการคำนวณค่าความผิดพลาดในการขับชี่เมื่อแบบจำลองแรงบิดใช้ค่า

$\beta=1.5$ ในการเลี้ยวครั้งที่ 4 จากการเลี้ยว 14 ครั้ง (หน่วย: เซนติเมตร)

i	X_test	Y_test	D
1	0.51	435.19	4.81
2	-0.32	435.15	4.85
3	-1.15	435.11	4.89
4	-1.98	435.07	4.92
5	-2.82	435.03	4.95
6	-3.65	434.98	4.99
7	-4.48	434.94	5.01
...			
415	-217.63	217.59	2.36
416	-217.64	216.76	2.34
417	-217.64	215.93	2.32
418	-217.64	215.09	2.31
419	-217.64	214.26	2.28
420	-217.63	213.43	2.27
421	-217.62	212.60	2.25
422	-217.61	211.76	2.23
...			
820	-3.91	0.14	0.10
821	-3.08	0.09	0.07
822	-2.25	0.04	0.03
823	-1.42	-0.01	0.07
824	-0.59	-0.04	0.04
825	0.24	-0.08	0.08
<i>Er</i>			2354.55
<i>Er_avg</i>			2.85

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปานัสมี เอี่ยมวรพงษ์ นิสิตสาขาวิศวกรรมยานยนต์ เป็นบุตรคนที่ 2 ของนายสุรพงษ์ และร้อยเอกหญิงวงเดือน เอี่ยมวรพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 23 เดือน พฤศจิกายน พุทธศักราช 2531 ที่โรงพยาบาลพระมงกุฎ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ จากโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ จังหวัดนครปฐม เมื่อปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550, เข้าร่วมการแข่งขัน Robot Design Contest ครั้งที่ 2 ในปีพุทธศักราช 2552 ,เข้าร่วมงานสัมมนาวิศวกรรมยานยนต์แห่งเอเชียแปซิฟิกครั้งที่ 15 (APAC15) ที่ประเทศเวียดนาม ในปีพุทธศักราช 2552 ฝึกงานที่บริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัด โดยได้รับมอบหมายให้ออกแบบและพัฒนาเครื่องเชื่อมต่อหัวลูกสูบอัตโนมัติ และออกแบบเครื่องนับจำนวนล้อต ปีพุทธศักราช 2553 เข้าร่วมการแข่งขัน Student Formula ในรายการ Japan Society of Automotive Engineering (JSAE) ที่ประเทศญี่ปุ่น มีหน้าที่รับผิดชอบงานด้าน Electronic, Cost Report และ ,Business-Case Presentation ของทีม Rapidamente จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเข้าร่วมการแข่งขัน Student Formula ในรายการ Thailand Society of Automotive Engineering (TSAE) มีหน้าที่รับผิดชอบงานด้าน Electronic, Cost Report และ ,Business-Case Presentation ของทีม Rapidamente จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพุทธศักราช 2554 เข้าร่วมการศึกษาโปรแกรม 5 ปี ปริญญาตรี-โท ซึ่งเป็นโปรแกรมการศึกษาต่อเนื่องของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 แล้วจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างการศึกษาได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัย Waseda และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการนำเสนอผลงานรูปแบบโปสเตอร์ในงานสัมมนา 5th IPS (Graduate School of Information, Production and Systems) International Collaboration Symposium ที่ประเทศญี่ปุ่น