การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว

นายบรรณกิจ คิดถูก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และวิชวลเซอร์โว

นายบรรณกิจ คิดถูก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

HUMAN-LEARNING STEERING CONTROL BASED-ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND VISUAL SERVO

Bannakit Khitthuk

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

____

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
กรรมการ

____

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บรรณกิจ คิดถูก : การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และวิชวลเซอร์โว (HUMAN-LEARNING STEERING CONTROL BASED-ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND VISUAL SERVO) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 163 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวต้นแบบสำหรับใช้งานจริงในยานพาหนะ เพื่อหาค่าความเหมาะสมในการควบคุมบังคับเลี้ยว ทั้งแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) และแบบอัตโนมัติ โดยใช้ข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์เป็นต้นแบบ ข้อมูลดังกล่าวได้จากการกำหนดให้มนุษย์เป็นผู้ขับ โดยใช้พวงมาลัยบนถนนจริง แล้วให้ระบบทำการเรียนรู้และจดจำลักษณะรูปแบบพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวนั้นด้วยเทคนิควิธีเครือข่ายประสาทเทียม (ANN) และสามารถรับรู้และจำแนกลักษณะรูปแบบพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวใหม่ที่ระบบยังไม่เคยเรียนรู้และจดจำมาก่อนได้ทันที โดยใช้เทคนิควิธีทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัวได้ (ART) ด้วยข้อมูลที่จำเป็นในการฝึกสอน ซึ่งได้แก่ ค่ามุมเลี้ยวล้อหน้า และความเร็วของยานพาหนะ ระบบการควบคุมบังคับเลี้ยวแบบอัตโนมัติที่ได้นี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพร่วมในการควบคุมบังคับเลี้ยวอย่างอัตโนมัติด้วย ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ ระบบการควบคุมบังคับเลี้ยวต้นแบบสำหรับใช้งานจริงที่มีความเหมาะสมสำหรับการเลี้ยวตามสถานการณ์ เสมือนการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์ด้วยพวงมาลัยจริง พร้อมทั้งสามารถเลือกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมการบังคับเลี้ยวได้ตามการฝึกสอนระบบของคนขับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา______________________

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_________________

BANNAKIT KHITTHUK : HUMAN-LEARNING STEERING CONTROL BASED-ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND VISUAL SERVO. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ARTHIT SRIKAEW, Ph.D., 163 PP.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK/ADAPTIVE CONTROL/HUMAN-LEARNING

This research presents design and development of steering control system prototype for both manual steering and automatic steering control. The control system uses steering data collected from human drivers on the actual road drive. The system then learns and recognizes human driver's responses and behaviors in steering control using artificial neural network. Moreover, the learned steering system can also accept and classify new behavior on steering control which has never seen or recognized before. This has been accomplished by using additional neural network called adaptive resonance theory. The learning system utilizes two type of data which are front wheel angle and vehicle speed. This automatic steering control has been applied together with front camera mounted on the vehicle and achieved a visual servo for driving and turning the vehicle automatically. The resulting automatic steering system from this work can be deployed in real-world environment which can perform a self-adaptation for steering the vehicle in a human-like fashion. The system can also adapt patterns of steering control based on different human driver's behaviors.

School of Electrical Engineering Student's Signature_________________

Academic Year 2014 Advisor's Signature_________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้โอกาส คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ ในทุกด้านที่เกี่ยวข้อง อย่างดียิ่ง รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

รองศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาส ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการ อย่างดียิ่ง ตลอดระยะเวลาการเข้าศึกษา

ขอขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง ที่อำนวยความสะดวกด้านเอกสารระหว่างศึกษา และขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่พิทยา ดีกล้า ที่ให้คำแนะนำแนวทางการศึกษาต่อ และคอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ นายเทอดศิลป์ โสมูล นายณัฐวุฒิ พจน์ปริญญา นายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง นายวัจน์ คำพวงวิจิตร นายเชาวลิต คิดถูก และ นายกมล ไชยศรี ที่คอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษา และสมาชิกชมรมโรบอททุกท่าน รวมถึงมิตรสหายที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งตั้งแต่ในอดีต และจนถึงปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเธียรวิชญ์ คุณแม่สุธวรวรรณ และ นายเชาวลิต คิดถูก รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดูความรัก ความเข้าใจ ความอบอุ่น ความห่วงใย และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา ตลอดจนคอยให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน อย่างดียิ่งมาโดยตลอด และขอขอบคุณ คุณทวิรชา พิมเสน ที่อยู่เคียงข้าง ให้ความรัก ความเข้าใจ ความห่วงใย และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา

บรรณกิจ คิดถูก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).... ข
กิตติกรรมประกาศ.... ค
สารบัญ .... ง
สารบัญตาราง .... ซ
สารบัญรูป.... ฎ

บทที่

1 บทนำ.... 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.... 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.... 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.... 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.... 4
2.1 บทนำ 4
2.2 ระบบบังคับเลี้ยว.... 4
2.2.1 โครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยว.... 5
2.2.2 ค่ามุมศูนย์ล้อพื้นฐาน 9
2.2.3 ประเภทของระบบบังคับเลี้ยว.... 13
2.3 องค์ประกอบฮาร์ดแวร์ของระบบ 17
2.3.1 รถกอล์ฟไฟฟ้า 17
2.3.2 ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (EPS) พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) และอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) 18
2.3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4 มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก 20

2.3.5 เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว 21

2.4 ระบบควบคุม 22

2.4.1 ตัวควบคุมพีไอดี 23

2.5 เครือข่ายประสาทเทียม 27

2.5.1 ความหมายเครือข่ายประสาทเทียม 27

2.5.2 ประวัติศาสตร์เครือข่ายประสาทเทียม 28

2.5.3 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายประสาทเทียม 29

2.5.4 ประเภทของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม 30

2.5.5 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ 30

2.5.6 การเรียนรู้ด้วยตนเองโดยทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (self-learning by adaptive resonance theory: ART) 31

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 33

2.6.1 เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network, ANN) 33

2.6.2 การขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) 34

2.7 สรุป 36

3 การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า 37

3.1 บทนำ 37

3.2 การปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า 38

3.2.1 แนวคิดในการเลือกชุดบังคับเลี้ยวสำหรับงานวิจัย 38

3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งระบบบังคับเลี้ยว 40

3.2.3 การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว 44

3.3 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (C-EPS) 45

3.4 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว 47

3.4.1 แนวคิดและสมมติฐานเบื้องต้น 47

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 การออกแบบ และการสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว 52

3.4.3 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว 58

3.5 สรุป 61

4 การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว 62

4.1 บทนำ 62

4.2 การเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว 62

4.3 การคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว 64

4.3.1 แนวคิดและสมมติฐานเบื้องต้น 64

4.3.2 กระบวนการฝึกสอนเครือข่ายทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว 67

4.4.3 กระบวนการใช้งานเครือข่ายทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว 108

4.4 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว 112

4.4.1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) 115

4.4.2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ 121

4.4.3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว 129

4.5 สรุป 138

5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 140

5.1 สรุป 140

5.2 ข้อเสนอแนะ 142

รายการอ้างอิง 143

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance) ต่างๆ 145

ภาคผนวก ข. ข้อมูลส่วนงานฮาร์ดแวร์ (เพิ่มเติม)............150

ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษา............153

ประวัติผู้เขียน 163

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 สรุปผลการทดลองวัดค่าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด 49
3.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นที่จ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า....50
3.3 ค่าพารามิเตอร์พีไอดี 57
4.1 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h 82
4.2 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h 82
4.3 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h 82
4.4 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h 83
4.5 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10 84
4.6 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50 84
4.7 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75 85
4.8 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90 85
4.9 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92 86
4.10 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 86
4.11 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96 87
4.12 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98 87
4.13 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99 88

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.14 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00 88
4.15 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ 89
4.16 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10 90
4.17 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50 90
4.18 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75 91
4.19 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90 91
4.20 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92 92
4.21 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 92
4.22 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96 93
4.23 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98 93
4.24 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99 94
4.25 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00 94
4.26 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ 95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.27 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10 96
4.28 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50 96
4.29 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75 97
4.30 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90 97
4.31 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92 98
4.32 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 98
4.33 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96 99
4.34 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98 99
4.35 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99 100
4.36 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00 100
4.37 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ 101
4.38 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10 102
4.39 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50 102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.40 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75 103
4.41 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90 103
4.42 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92 104
4.43 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 104
4.44 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96 105
4.45 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98 105
4.46 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99 106
4.47 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00 106
4.48 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ 107
4.49 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 109
4.50 แสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 110
4.51 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 111
4.52 แสดงผลการทดสอบการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 111

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างกลไกวิธีเลี้ยวแบบแอ็กเคอร์มาน 5
2.2 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน 6
2.3 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบเฟืองขับเฟืองสะพาน 7
2.4 ตัวอย่างรถบรรทุกที่ใช้ระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน 8
2.5 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานการทำงานภายในของกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน 8
2.6 ตัวอย่างมุมแคสเตอร์บวก 9
2.7 ตัวอย่างมุมแคสเตอร์ลบ 10
2.8 ตัวอย่างมุมแคมเบอร์บวก 10
2.9 ตัวอย่างมุมแคมเบอร์ลบ 11
2.10 ตัวอย่างมุมคิงพิน หรือมุมเอียงของแกนบังคับเลี้ยว 12
2.11 ตัวอย่างมุมโทอิน 12
2.12 ตัวอย่างมุมโทเอาต์ ของกลไกบังคับเลี้ยวโดยวิธีแอ็คเคอร์แมน 13
2.13 column electric power steering, column type-EPS 15
2.14 pinion electric power steering, pinion type-EPS 15
2.15 rack electric power steering, rack type-EPS 16
2.16 dual pinion type electric power steering, dual pinion type-EPS 16
2.17 รถกอล์ฟไฟฟ้า รุ่น GOLFER 2S 17
2.18 กลไกแบบชุดเฟืองขับ และเฟืองสะพาน ของรถกอล์ฟไฟฟ้า 18
2.19 มอดูลไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280 20
2.20 มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก 21
2.21 เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว 21
2.22 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.23 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด.....22
2.24 แผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....23
2.25 โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....27
2.26 โครงสร้างเครือข่ายแบบฟัซซี-นิวรอล (Huaiquan Zang and Min Liu (2007)).....34
3.1 รถกอล์ฟไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....37
3.2 ชุดบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งจากโรงงาน.....38
3.3 ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย
พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์.....40
3.4 ตำแหน่งน็อตตัวผู้ (bolt) ยึดแกนพวงมาลัยที่ติดตั้งจากโรงงาน.....41
3.5 ชิ้นส่วนชุดบังคับเลี้ยว และแผงคอนโซลหน้าที่ถูกถอดออก.....41
3.6 ชิ้นส่วนหัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อนที่เปลี่ยนสลับกัน.....42
3.7 หัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อนที่เปลี่ยนสลับเสร็จแล้ว.....42
3.8 การยึดชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) ติดกับโครงรถไฟฟ้า.....43
3.9 ตำแหน่งติดตั้งชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU).....43
3.10 ตำแหน่งการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว.....44
3.11 รถกอล์ฟไฟฟ้าติดตั้งชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับ
ที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS).....45
3.12 ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว (C-EPS) ของรถกอล์ฟไฟฟ้า.....46
3.13 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว.....47
3.14 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)
ในขณะไม่มีการหมุนพวงมาลัย.....48
3.15 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)
ในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย.....48
3.16 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)
ในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวขวา.....49
3.17 วงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้น.....50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.18 การทดสอบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าในเบื้องต้นแบบใช้ปุ่มกด 51
3.19 อุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยว 52
3.20 การหมุนปรับตั้งค่าเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว..............................53
3.21 แผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี..............................56
3.22 แผนภาพระบบควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว..............................57
3.23 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h 58
3.24 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h 58
3.25 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h 59
3.26 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h 59
4.1 สภาวะเริ่มต้นก่อนการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว 63
4.2 แผนผังการเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว 64
4.3 แสดงทางเดินรถตามสมมติฐาน 66
(ก) ทางเดินรถเลี้ยวซ้ายตามสมมติฐาน 66
(ข) ทางเดินรถเลี้ยวขวาตามสมมติฐาน 66
4.4 ตำแหน่งแยกถนนที่ทำการทดลอง 68
4.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5 69
4.6 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10 69
4.7 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 15 70
4.8 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 20 70
4.9 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h รวมทั้ง 4 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5, 10, 15, และ 20..............................71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10 72
4.11 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 15 72
4.12 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 20 73
4.13 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 25 73
4.14 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 30 74
4.15 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h รวมทั้ง 5 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 75
4.16 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3 76
4.17 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5 76
4.18 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 7 77
4.19 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h รวมทั้ง 3 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7 78
4.20 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3 79
4.21 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5 79
4.22 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 7 80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.23 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h รวมทั้ง 3 รอบ
โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7 81
4.24 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h
เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 11 108
4.25 แผนภาพโดยรวมของงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์
ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ในส่วนการฝึกสอนระบบ 112
4.26 แผนภาพโดยรวมของงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์
ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ในส่วนการใช้งานจริง 113
4.27 แผนผังการเรียนรู้ และการใช้งานจริงของการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์
ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม....115
4.28 การทำงานระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม
แบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว....116
4.29 แสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h....117
(ก) แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม....117
(ข) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม 117
4.30 แสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h....118
(ก) แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม....118
(ข) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม 118
4.31 แสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h....119
(ก) แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม....119
(ข) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม 119
4.32 แสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h....120
(ก) แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม....120
(ข) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม 120
4.33 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h
ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม 124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.34 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม 124
4.35 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม 127
4.36 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม 127
4.37 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 12 128
(ก) ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม 128
(ข) ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ขับจริง โดยใช้พวงมาลัย 128
4.38 มุมมองด้านหน้าจากภายในตัวรถกอล์ฟไฟฟ้า 129
4.39 แผนผังการทำงานการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และวิชวลเซอร์โว 130
4.40 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 12 131
4.41 ระบบการทำงานของแบบจำลองการเลี้ยว (เทอดศิลป์ โสมูล (2012)) 132
4.42 ตัวอย่างผลการค้นหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่จากข้อมูลภาพ สำหรับการเลี้ยวซ้าย 133
4.43 ตัวอย่างผลการค้นหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่จากข้อมูลภาพ สำหรับการเลี้ยวขวา 133
4.44 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายด้วยค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF 135
4.45 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาด้วยค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF 135
4.46 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวซ้าย 136
4.47 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวจริงเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวซ้าย 136
4.48 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวขวา 137
4.49 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวจริงเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวขวา 137

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ศาสตร์ด้านปัญญาประดิษฐ์ ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย และเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก ช่วยให้มนุษย์มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น และยังเป็นเครื่องมือสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาองค์ความรู้ต่างๆ ตลอดจนทำให้เกิดนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ใหม่ๆ ขึ้นมาอย่างมากมาย เช่น หุ่นยนต์ รถยนต์แบบไร้คนขับ และอื่นๆอีกมากมาย และเทคโนโลยีในปัจจุบันก็ยังสามารถสร้างเครือข่ายที่มีรูปแบบการทำงานของการประมวลผลเหมือนกับสมองของมนุษย์ ที่ใช้ในการเรียนรู้ จดจำ สิ่งต่างๆ ตลอดจนสามารถคิดหาคำตอบเองได้ ทำให้สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้มีขีดความสามารถที่เพิ่มมากขึ้น และมีความหลากหลายในการทำงานมากยิ่งขึ้น เรียกว่า เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network, ANN) ซึ่งได้รับความสนใจจากหลากหลายสาขาวิชา นำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างมากมาย เช่น การจดจำรูปแบบ (pattern recognition) การจับกลุ่ม (clustering/categorization) การประมาณค่าฟังก์ชัน (function approximation) การทำนาย (prediction/forecasting) การหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) หน่วยความจำอ้างอิงด้วยเนื้อหา (content-addressable memory) ระบบควบคุม (control system) เป็นต้น และมีผลงานวิจัยเผยแพร่สู่สังคมอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ระบบควบคุม ถือเป็นงานที่นำเอาเครือข่ายประสาทเทียม มาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดงานหนึ่ง การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว มุ่งเน้นสร้างการควบคุมให้เป็นแบบปรับตัวได้ ในการใช้งานบนถนนจริง การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) ค่อนข้างมีความยากที่จะสามารถควบคุมให้รถไฟฟ้านั้นเลี้ยวไปในทิศทางที่เหมาะสม และในการควบคุมระบบบังคับเลี้ยวแบบอัตโนมัติก็เช่นเดียวกัน การกำหนดมุมเลี้ยวที่มีความเหมาะสมให้กับรถกอล์ฟไฟฟ้าตามสภาวะต่างๆ นั้นไม่ใช่เรื่องง่าย ถึงแม้ว่าระบบการควบคุมบังคับเลี้ยว มีตัวควบคุมแบบพีไออยู่ภายในระบบแล้ว ระบบการควบคุมแบบใช้ตัวควบคุมพีไอ ทำหน้าที่ช่วยให้ระบบนั้นลู่เข้าสู่เป้าหมายที่อ้างอิง แต่ตัวควบคุมพีไอ ไม่สามารถช่วยกำหนดค่ามุมการเลี้ยวที่เหมาะสมให้กับระบบการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ ในงานวิจัยนี้จึงให้มนุษย์เป็นต้นแบบกำหนดมุมเลี้ยวที่เหมาะสม และให้เครือข่ายประสาทเทียม เรียนรู้ จดจำ เพื่อนำไปใช้ควบคุมระบบบังคับเลี้ยว

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 รถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นแบบขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าแบบ 2 ที่นั่ง

1.3.2 รถกอล์ฟไฟฟ้ามีขีดจำกัดความเร็ว คือ สามารถเลือกความเร็วได้เฉพาะ 3,7,10,13,19,20,22,25,29 Km/h เท่านั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เฉพาะ ความเร็ว 3 Km/h และ 7 Km/h เท่านั้น

1.3.3 ชุดบังคับเลี้ยวที่ใช้เป็นชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column electric power steering, column type-EPS)

1.3.4 สภาพแวดล้อมถนนโล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ

1.3.5 สภาพอากาศท้องฟ้าโปร่ง ไม่มีฝนตก

1.3.6 พัฒนาอัลกอริทึมด้วยโปรแกรมแม็ทแล็ป

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การทำงานของระบบอยู่ในช่วงเวลากลางวัน

1.4.2 การทำงานของระบบใช้กับถนนลาดยาง พื้นถนนเรียบ ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4.3 รถกอล์ฟไฟฟ้าไม่เกิดการหมุนฟรีที่ล้อในขณะทำงาน

1.4.4 ความเร็วของรถกอล์ฟไฟฟ้าเป็นความเร็วที่คงที่ตลอดการทำงาน

1.4.5 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการควบคุมมุมเลี้ยวเท่านั้น มุมเลี้ยวที่พิจารณากำหนดใช้เฉพาะในงานวิจัยนี้เท่านั้น และเป็นไปตามข้อจำกัดทางกลของรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5.2 สามารถเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาต่อยอด เพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านความปลอดภัยของรถยนต์ หรืองานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึง ที่มาความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขต ของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ รวมทั้งแนะนำองค์ประกอบ และเนื้อหาพอสังเขปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยเกี่ยวที่ข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมา และกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ ระบบบังคับเลี้ยว อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงแนวทางการพัฒนางานวิจัยที่ผ่านมา

บทที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า กล่าวถึง การดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในส่วนงานด้านฮาร์ดแวร์ ได้แก่ การเลือกระบบบังคับเลี้ยว การปรับแต่งติดตั้งระบบบังคับเลี้ยว และการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย)

บทที่ 4 การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว กล่าวถึง การจัดเก็บข้อมูลที่ใช้สำหรับงานวิจัย การระบุและคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึง บทสรุปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะที่มีต่องานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับ การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว เป็นงานวิจัยสร้างต้นแบบ เพื่อนำไปทดสอบใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมจริง โดยเนื้อหาของงานวิจัยประกอบด้วย ส่วนงานด้านฮาร์ดแวร์ และส่วนงานด้านซอฟต์แวร์ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับศาสตร์ทางเครื่องกล ยานยนต์ ไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ เป็นหลัก ในบทที่ 2 นี้นำเสนอส่วนงานด้านฮาร์ดแวร์ที่ศึกษาและนำมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ระบบบังคับเลี้ยว ซึ่งระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ในยานพาหนะมีหลากหลายรูปแบบ ตามการออกแบบของแต่ละบริษัทผู้ผลิต ตามลักษณะทางกายภาพของยานพาหนะ และตามข้อจำกัดด้านต้นทุนการผลิตของยานพาหนะนั้นๆ พร้อมทั้งนำเสนอ องค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์อื่นๆ ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และมอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลปีนสัญญาณแอนะล็อก

2.2 ระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยว ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ลักษณะการทำงานเป็นการเปลี่ยนแรงหมุนเชิงมุมของพวงมาลัย ให้เป็นแรงในแนวเชิงเส้น ซึ่งแรงหมุนพวงมาลัยดังกล่าวได้รับมาจากผู้ขับขี่ภายในห้องโดยสาร และถ่ายทอดแรงออกไปที่ชิ้นส่วนการทำงาน ซึ่งยึดติดกับล้อคู่หน้า เพื่อทำให้ล้อคู่หน้าเปลี่ยนทิศทางตามที่ถูกแรงกระทำพร้อมๆ กัน

คุณลักษณะของระบบบังคับเลี้ยวที่ดี ได้แก่

1. ระบบบังคับเลี้ยวต้องมีความแม่นยำ และคล่องตัว

2. ต้องมีความเหมาะสมตามสถานการณ์ เช่น น้ำหนักพวงมาลัยต้องเบาขณะที่ยานพาหนะมีความเร็วต่ำ และต้องหนักขึ้นเมื่อยานพาหนะมีความเร็วสูง

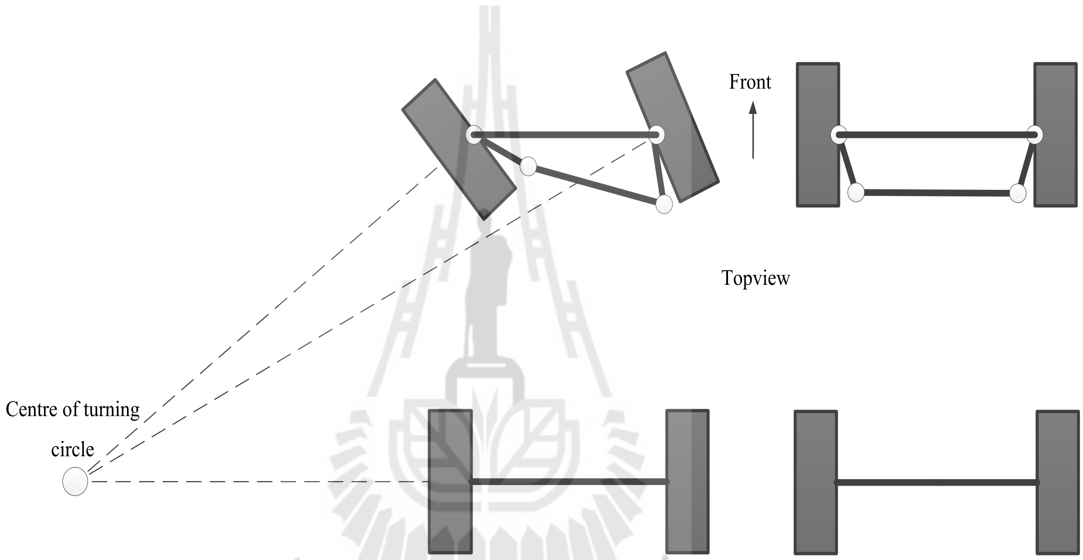
3. ภายหลังจากการเลี้ยวต้องมีการคืนกลับของล้อที่เหมาะสม

4. แรงที่ส่งผ่านจากท้องถนนมายังพวงมาลัยต้องมีค่าน้อย

ในปัจจุบันโครงสร้างกลไกวิธีการเปลี่ยนทิศทางล้อคู่หน้าของยานพาหนะที่นิยมใช้เป็นแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann steering) ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นมาโดย รูดอล์ฟ แอ็กเคอร์แมน (Rodolf Ackermann) เพื่อแก้ปัญหาการเลี้ยวโค้งที่ไม่สมดุล และการไถลในขณะเลี้ยว นำมาซึ่งการสึกกร่อน

ที่หน้ายาง พร้อมทั้งช่วยให้ยานพาหนะเลี้ยวโค้งได้อย่างสมดุล แสดงโครงสร้างกลแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann steering) ดังรูปที่ 2.1

โครงสร้างกลไกวิธีแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann steering) คือ สภาวะที่เกิดจุดศูนย์กลางร่วมของล้อทั้ง 4 ล้อ ในขณะเลี้ยวโค้ง และมุมเลี้ยวที่ล้อหน้าด้านซ้ายและด้านขวามีค่าไม่เท่ากันในขณะเลี้ยว กล่าวคือ ตัวอย่างเมื่อเลี้ยวซ้าย ผลจากกลไกแอ็คแคอร์แมนทำให้มุมเลี้ยวที่ล้อหน้าด้านซ้ายจะมีค่ามากกว่ามุมเลี้ยวที่ล้อหน้าด้านขวา และเกิดจุดศูนย์การเลี้ยวร่วมของล้อหน้าด้านซ้าย ล้อหน้าด้านขวา และล้อหลังทั้งสองล้อ ผลดังกล่าวช่วยให้การเลี้ยวมีความสมดุล ไม่เกิดการลื่นไถลที่หน้ายาง สำหรับการเลี้ยวขวาก็เช่นเดียวกัน แต่มุมเลี้ยวที่มากกว่าจะเป็นล้อหน้าด้านขวา



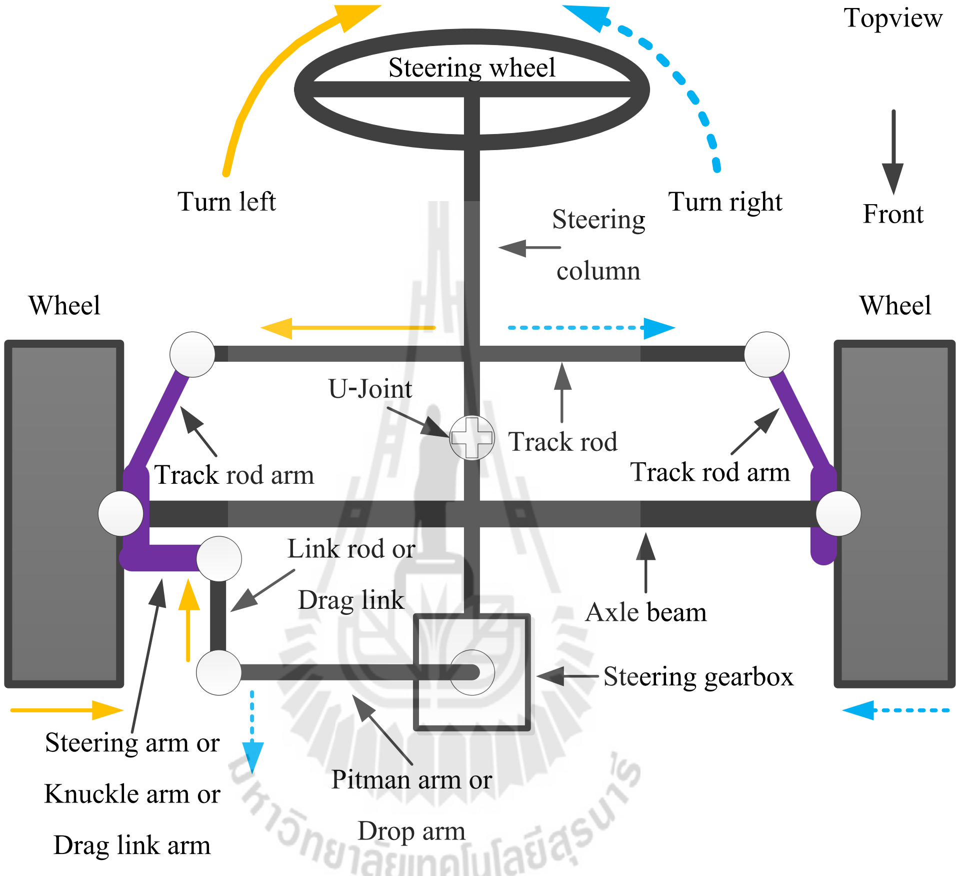
รูปที่ 2.1 โครงสร้างกลไกวิธีเลี้ยวแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann steering)

2.2.1 โครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยว

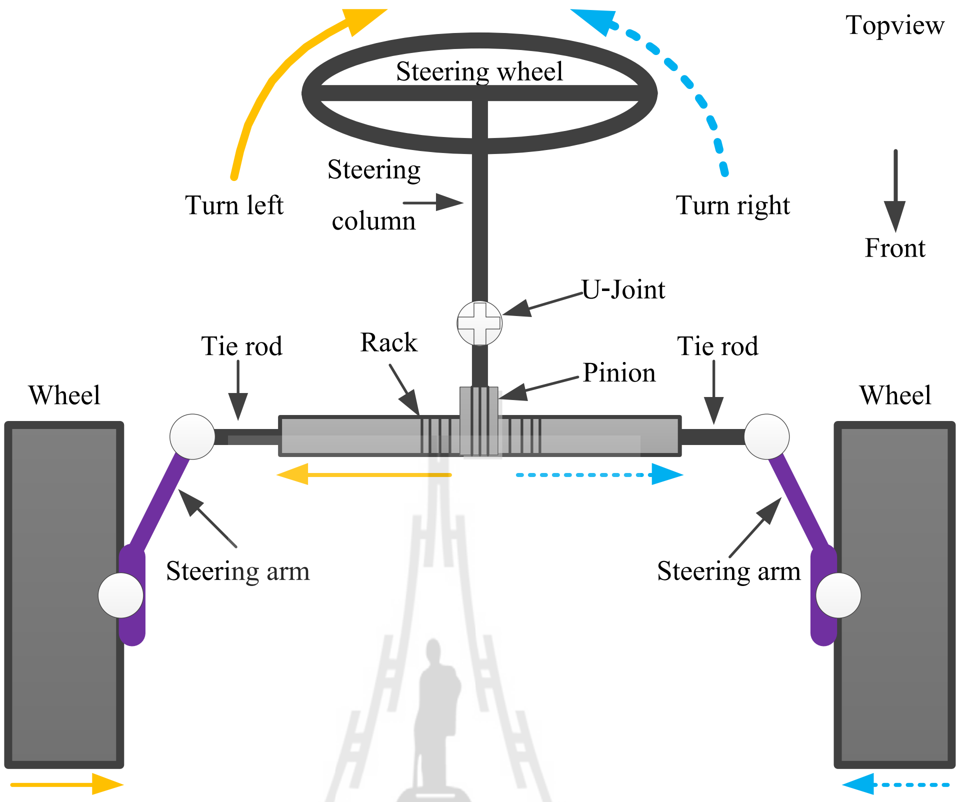
ในการหมุนพวงมาลัยภายในห้องโดยสาร แล้วทำให้ล้อหน้าเปลี่ยนทิศทางได้นั้น ต้องอาศัยหลักการออกแบบทางด้านกลศาสตร์ เพื่อสร้างกลไกการเปลี่ยนแรงหมุนให้เป็นแรงในแนวแกน ลักษณะกลไกการเปลี่ยนแรงหมุนเป็นแรงแนวแกน เรียกว่า กระปุกเกียร์ (steering gearbox) ซึ่งสามารถแยกย่อยได้เป็นแบบต่างๆ เช่น แบบเฟืองตัวหนอนและลูกกลิ้ง (worm & roller type) แบบลูกเบี้ยวและกระเดื่อง (cam & lever type) แบบเฟืองตัวหนอนและเฟืองเซ็กเตอร์ (worm & sector) แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type) แบบเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack & pinion) เป็นต้น

กระปุกเกียร์ที่นิยมใช้หลักๆมี 2 แบบ ซึ่งทั้ง 2 แบบจะมีลักษณะโครงสร้างของกลไกการบังคับเลี้ยวหรือก้านต่อพวงมาลัย (steering linkege) และอุปกรณ์การทำงานที่ไม่เหมือนกัน ได้แก่

กระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox) แสดงตัวอย่างโครงสร้างกลไกการทำงานดังรูปที่ 2.2 และกระปุกเกียร์แบบเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack & pinion type steering gearbox) แสดงตัวอย่างโครงสร้างกลไกการทำงานดังรูปที่ 2.3



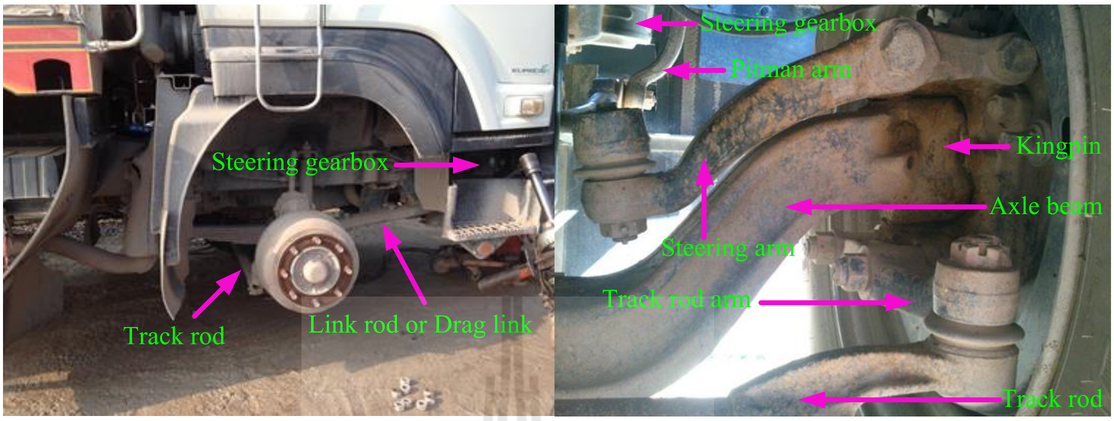
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox)



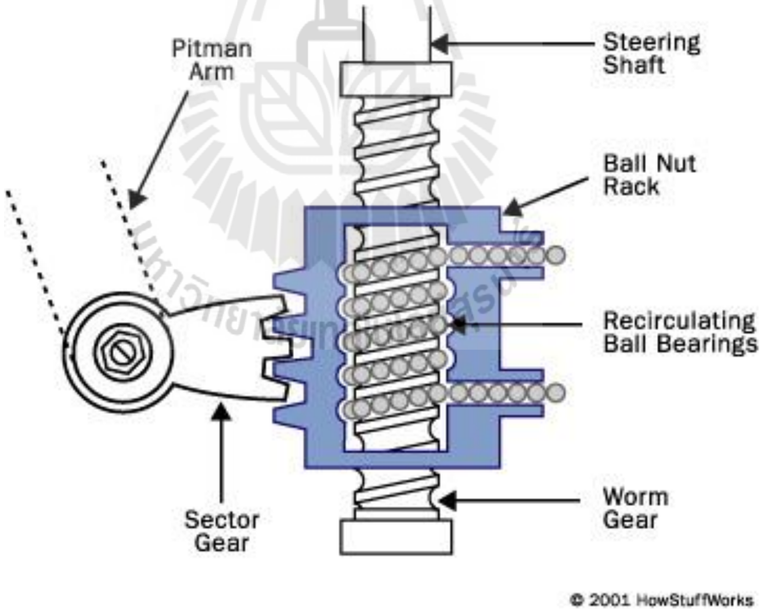
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack & pinion type steering gearbox)

1. กระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox) ส่วนมากนิยมใช้ในรถขนาดใหญ่ เช่น รถบรรทุก รถบัส เป็นต้น มีลักษณะกลไกการทำงานเป็นแบบทดแรง ซึ่งมีทั้งแบบธรรมดาและแบบช่วยแรง โดยใช้เพลาเฟืองตัวหนอน (worm shaft) เชื่อมต่อจากแกนพวงมาลัยเป็นตัวขับกำลัง ซึ่งมีเรือนลูกปืน (ball nut rack) สวมที่เพลาเฟืองตัวหนอน และระหว่างช่องฟันเพลาเฟืองตัวหนอนกับเรือนลูกปืนมีลูกปืนเคลื่อนที่หมุนวนเพื่อลดความฝืดหรือความเสียดทานระหว่างเพลาเฟืองตัวหนอนกับเฟืองเพลาขวาง (sector shaft) และช่วยให้พวงมาลัยเบาในขณะหมุนพวงมาลัย เมื่อเพลาเฟืองตัวหนอนหมุนตามการหมุนพวงมาลัย เรือนลูกปืนก็จะเคลื่อนที่ขับให้เฟืองเพลาขวางทำงาน ส่งแรงไปที่ขาไก่ (pitman arm) แสดงตัวอย่างรถบรรทุกที่ใช้ระบบบังคับเลี้ยวช่วยแรงแบบกลไกกระปุกเกียร์ลูกปืนหมุนวนดังรูปที่ 2.4 และแสดงแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานภายในของระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox) ดังรูปที่ 2.5 อัตราทดการบังคับเลี้ยว (steering ratio)

หาได้จากสัดส่วนระหว่างมุมของการหมุนพวงมาลัย เทียบกับมุมการเคลื่อนที่ของขาไก่ (pitman arm)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรถบรรทุกที่ใช้ระบบบังคับเลี้ยวกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานการทำงานภายในของกระปุกเกียร์แบบลูกปืนหมุนวน (recirculating ball type steering gearbox)

(ที่มา : http://auto.howstuffworks.com/steering3.htm)

2. กระปุกเกียร์แบบเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack & pinion type steering gearbox) เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากในรถยนต์ทั่วไป มีความแม่นยำ มั่นคง และตอบสนองได้เร็ว มีทั้ง โดยโครงสร้างกลไกพื้นฐาน

คือ เฟืองขับเชื่อมต่อกับแกนพวงมาลัยเป็นตัวหมุนออกแรง เพื่อขับเฟืองสะพานซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับคันชักคันส่ง (tie rod) ทำให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนไปทางซ้ายหรือทางขวา ตามทิศทางการหมุน ซึ่งมีทั้งแบบธรรมดาและแบบช่วยแรง แสดงแผนภาพโครงสร้างกลไกพื้นฐานของระบบบังคับเลี้ยวแบบเฟืองขับเฟืองสะพาน ดังรูปที่ 2.3 อัตราทดของการบังคับเลี้ยว (steering ratio) หาได้จากสัดส่วนระหว่างมุมของการหมุนพวงมาลัย เทียบกับมุมการเคลื่อนที่ของล้อหน้า

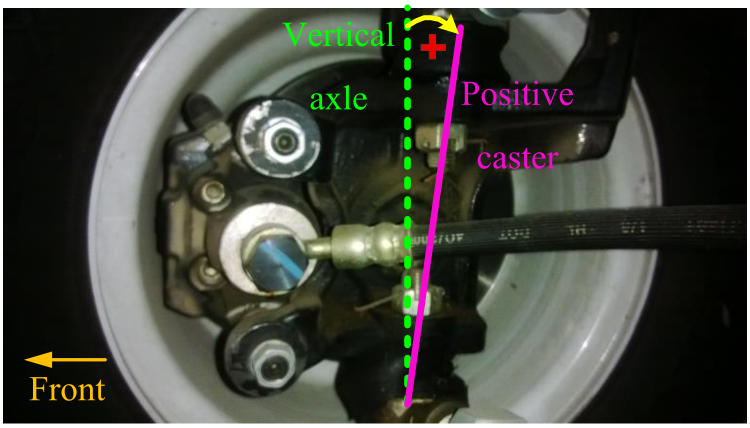
2.2.2 ค่ามุมศูนย์ล้อพื้นฐาน

รถยนต์จำเป็นต้องมีเสถียรภาพที่ดีในการขับขี่ เมื่ออยู่บนทางตรงต้องสามารถควบคุมรถยนต์ให้ตรงนิ่งได้ง่าย และในขณะเลี้ยวโค้งก็ต้องสามารถบังคับเลี้ยวโค้งได้อย่างราบรื่น ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดตั้งค่าต่างๆที่ล้อรถยนต์และระบบบังคับเลี้ยว เรียกว่า มุมศูนย์ล้อพื้นฐาน มี 5 มุม ได้แก่

1. มุมแคสเตอร์ (caster angle) คือ มุมเอียงไปด้านหน้า หรือเอียงไปด้านหลัง ของแกนสลักล้อหน้าหรือแกนคอม้า (knuckle) เมื่อมองจากด้านข้างตัวรถ มี 3 แบบ คือ

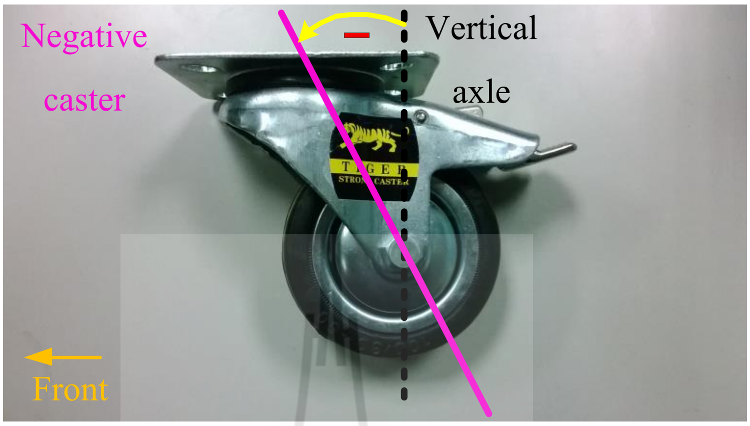
มุมแคสเตอร์เป็นศูนย์ เมื่อตั้งตรงขนานกับแกนในแนวดิ่ง

หากแกนเอียงไปทางด้านหลังจากแนวดิ่ง เรียกว่า แคสเตอร์บวก (positive caster) มีผลคือ เพื่อช่วยควบคุมแนวเดินหน้าตรงของตัวรถป้องกันไม่ให้ล้อส่าย รถยนต์ทั่วไปจะตั้งไว้ที่ค่าบวก แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างมุมแคสเตอร์บวก (positive caster) (รถกอล์ฟไฟฟ้า)

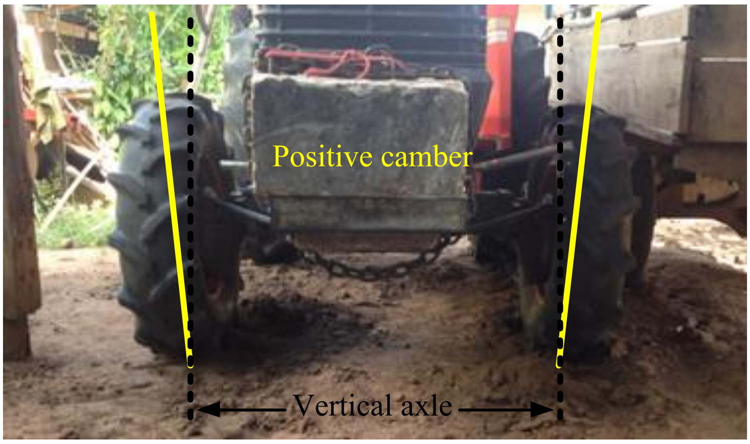
และในทางตรงข้ามหากแกนเอียงไปทางด้านหน้าจากแนวดิ่ง เรียกว่า แคสเตอร์ลบ (negative caster) มีผลคือ เพื่อช่วยให้ล้ออิสระสามารถเลี้ยวตามได้ง่าย ใช้ประโยชน์สำหรับล้อที่มีหน้าที่กลิ้งตามตาม เช่น ล้อรถเข็นเดินตาม เป็นต้น แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างมุมแคสเตอร์ลบ (negative caster)

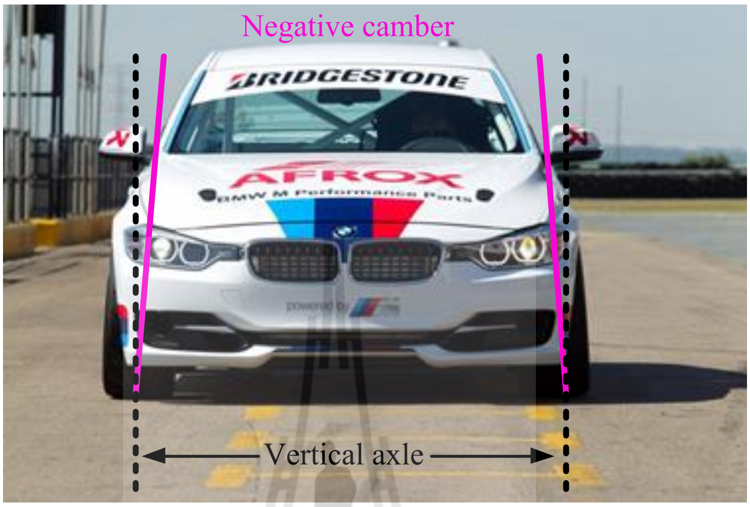
2. มุมแคมเบอร์ (camber angle) คือ มุมเอียงด้านบนล้อหน้าจากแนวดิ่ง เมื่อมองจากด้านหน้าตัวรถ มี 3 แบบ ได้แก่

แคมเบอร์บวก (position camber) หมายถึง มุมล้อหน้าด้านบนเอียงออกด้านนอกตัวรถ มีผลคือ ช่วยลดการต้านแรงหมุนพวงมาลัย ทำให้สามารถหักเลี้ยวพวงมาลัยได้ง่าย และช่วยรองรับน้ำหนักได้ดีสำหรับระบบกันสะเทือนแบบคานแข็ง ข้อเสีย คือ อาจทำให้ตัวรถวิ่งเอียงออกด้านข้างได้ง่าย และอาจมีผลทำให้ตัวรถพลิกคว่ำได้ง่ายขณะเข้าโค้งด้วยความเร็วสูง จึงเหมาะกับรถที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่น แทร็กเตอร์ เป็นต้น แสดงตัวอย่างแคมเบอร์เป็นบวกดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างมุมแคมเบอร์บวก (positive camber)

แคมเบอร์ลบ หมายถึง มุมล้อหน้าด้านบนเอียงเข้าด้านในตัวรถ มีผลคือ ช่วยในการทรงตัว และเข้าโค้งได้ดี แต่ส่งผลให้พวงมาลัยหนักขึ้น จึงเหมาะสำหรับรถที่ต้องใช้ความเร็วอยู่เสมอ เช่น รถแข่ง เป็นต้น แสดงตัวอย่างแคมเบอร์เป็นลบ ดังรูปที่ 2.9

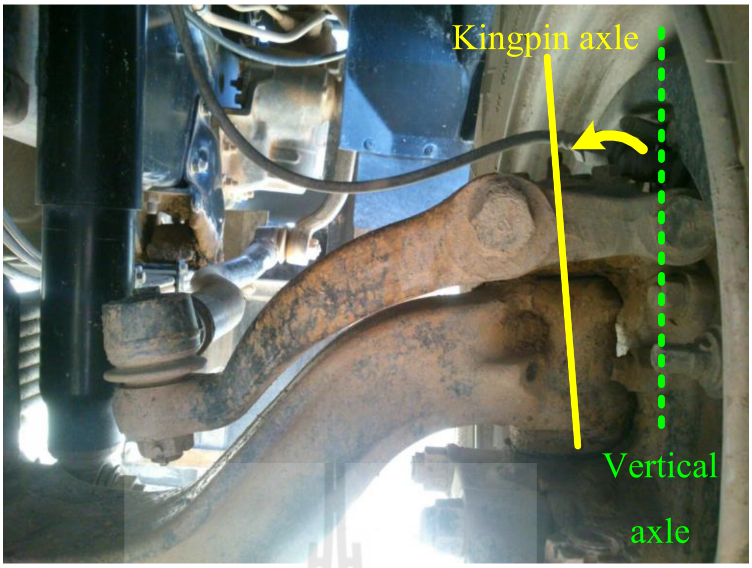


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างมุมแคมเบอร์ลบ (negative camber)

(ที่มา : http://www.automobilesreview.com)

แคมเบอร์ศูนย์ คือ ล้อตั้งตรงขนานกับแกนตั้งในแนวดิ่ง เมื่อมองจากด้านหน้าตัวรถ สำหรับมุมแคมเบอร์ทั้งที่เป็นด้านบวกและที่เป็นด้านลบส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนของหน้ายางที่ไม่สม่ำเสมอ รถยนต์ทั่วไปจะถูกตั้งค่ามุมแคมเบอร์ให้เป็น 0 หรือ เข้าใกล้ 0 เพื่อป้องกันการสึกกร่อนที่ไม่สม่ำเสมอของหน้ายาง ซึ่งระบบกันสะเทือนของรถยนต์จะถูกออกแบบให้ช่วยรักษาสมดุลของมุมแคมเบอร์ด้วย

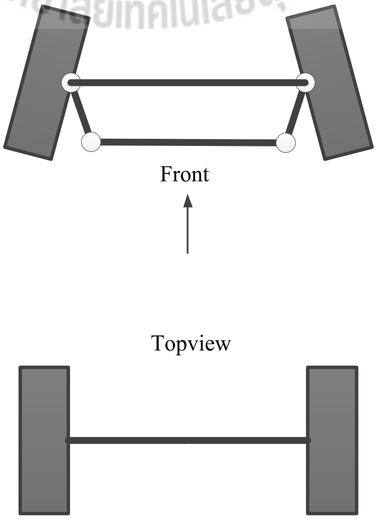
3. มุมคิงพิน หรือมุมเอียงของแกนบังคับเลี้ยว (kingpin inclination angle) คือ มุมเอียงเข้าข้างในของแกนบังคับเลี้ยว เมื่อมองจากด้านหน้าตัวรถ มีผลคือ เพื่อช่วยในการตั้งค่ามุมแคมเบอร์ ช่วยให้รถเลี้ยวง่าย หรือพวงมาลัยเบา ช่วยให้รถรักษาสภาพแนวหน้าตรงได้ดีขึ้น และช่วยให้ล้อหน้ากลับมาอยู่ในแนวตรงได้เองเมื่อปล่อยพวงมาลัยภายหลังจากการหักเลี้ยวแล้วเสร็จ แสดงตัวอย่างมุมเอียงของแกนบังคับเลี้ยว ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างมุมคิงพิน หรือมุมเอียงของแกนบังคับเลี้ยว (kingpin inclination angle)

4. มุมโท (toe) คือ ค่าความต่างกันของระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหน้าและด้านหลังของล้อคู่หน้า เมื่อมองจากด้านบนตัวรถ มี 2 แบบ ได้แก่ โทอิน และโทเอ้าต์

โทอิน หมายถึง ล้อด้านหน้าหุบเข้า เพราะระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหน้าของล้อคู่หน้า มีค่าน้อยกว่า ระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหลังของล้อคู่หน้า มีผล คือ ช่วยรักษาสภาพแนวหน้าตรงได้ดีขึ้น ช่วยชดเชยการสึกหรอของลูกหมากต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และช่วยป้องกันอาการไถลออกด้านข้างจากล้อที่มีมุมแคมเบอร์เป็นบวก แสดงตัวอย่างมุมโทอินดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างมุมโทอิน

โทเอ้าต์ หมายถึง ล้อด้านหน้ากางออก เพราะระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหน้าของล้อคู่หน้า มีค่ามากกว่า ระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหลังของล้อคู่หน้า มีผล คือ ถ้าหากกลไกของระบบบังคับเลี้ยวเป็นแบบแอ็คเคอร์แมน (ackermann steering) จะเกิดมุมนี้ขณะเลี้ยว ซึ่งช่วยให้เลี้ยวโค้งได้อย่างสมดุล แสดงตัวอย่างมุมโทเอาต์ที่เกิดขึ้นขณะเลี้ยวโค้ง ดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างมุมโทเอาต์ ของกลไกบังคับเลี้ยวโดยวิธีแอ็คเคอร์แมน (ackermann steering) (รถกอล์ฟไฟฟ้า)

5. มุม-โทเอาต์ ขณะเลี้ยว (toe-out on turn) คือ ล้อด้านหน้ากางออก เพราะระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหน้าของล้อคู่หน้า มีค่ามากกว่า ระยะห่างระหว่างล้อซ้ายขวาด้านหลังของล้อคู่หน้า โดยเกิดขึ้นในขณะเลี้ยว เนื่องจากกลไกของระบบบังคับเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน (ackermann steering) มีผล คือ เพื่อลดการลื่นไถลของหน้ายาง และช่วยให้รถเลี้ยวโค้งได้อย่างสมดุล ตัวอย่างมุมโทเอาต์ที่เกิดขึ้นขณะเลี้ยวโค้ง แสดงดังรูปที่ 2.12

2.2.3 ประเภทของระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยวสามารถจัดแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้แรงควบคุมของผู้ขับขี่ได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ระบบบังคับเลี้ยวแบบธรรมดา (manual) ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรง (power) และระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า (by wire) ซึ่งทั้ง 3 ประเภทสามารถแบ่งย่อยลึกลงไปได้อีก

1. ระบบบังคับเลี้ยวแบบธรรมดา (manual)
2. ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรง (power)
3. ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า (by wire)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (electric power steering, EPS) เท่านั้น

ระบบบังคับเลี้ยวช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (electric power steering, EPS)

ระบบบังคับเลี้ยวช่วยแรง (power steering system) คือระบบที่เข้ามาช่วยทดกำลังการหมุนวงพวงมาลัย ไปในทิศทางต่างๆ ให้มีความรู้สึกที่เบาขึ้น ซึ่งไม่ต้องใช้แรงมาก โดยเฉพาะการหักมุมเลี้ยวในพื้นที่แคบๆ เช่นการถอยเข้า-ออกในที่จอดรถ เป็นต้น ระบบพวงมาลัยเพาเวอร์ใช้วิธีทดแรง โดยจะมีแรงจากชุดอุปกรณ์ในระบบนั้นๆ เข้ามาช่วยในการบังคับเลี้ยว

อุปกรณ์ที่เป็นส่วนหลัก ของระบบบังคับเลี้ยวช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ได้แก่ วงพวงมาลัย (steering wheel)

ชุดแกนพวงมาลัย (steering column assembly)

ชุดข้อต่ออ่อน (steering U-joint)

ชุดเฟืองขับ และเฟืองสะพาน (rack & pinion)

คันส่ง (tie rod)

มอเตอร์ไฟฟ้า (EPS-motor)

อุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)

ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า (power steering ECU)

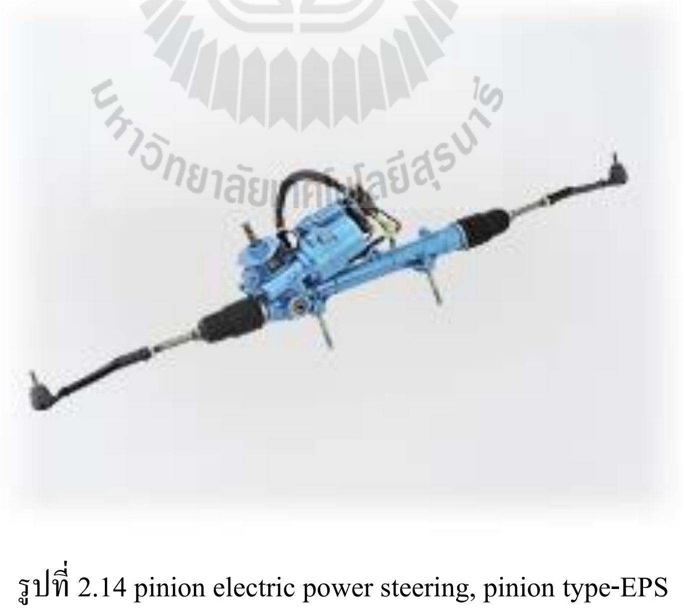
การทำงานระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (electric power steering, EPS) เมื่อผู้ขับขี่ออกแรงหมุนวงพวงมาลัยไปในทิศทางใด ทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์รับรู้แรงบิด ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ชุดแกนพวงมาลัย ก็จะส่งสัญญาณไปที่ชุดควบคุม ชุดควบคุมก็จะสั่งงานให้มอเตอร์ไฟฟ้านั้นทำงาน เพื่อช่วยเสริมแรงให้ผู้ขับขี่ออกแรงในการหมุนพวงมาลัยน้อยลงในการควบคุมบังคับเลี้ยว เพื่อความปลอดภัยและความรู้สึกดีในการขับขี่ ระบบจึงมีการรับค่าสัญญาณความเร็วรถเข้ามาที่ชุดควบคุมด้วย ในขณะที่รถยนต์มีความเร็วสูงขึ้น ระบบก็จะควบคุมให้พวงมาลัยนั้นหนักขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วของรถยนต์ เพื่อให้ผู้ขับขี่ยังคงสามารถควบคุมรถยนต์ได้อย่างสมดุล เพราะถ้าหากรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แล้วพวงมาลัยยังเบาและเลี้ยวได้ง่าย อาจเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุรถยนต์พลิกคว่ำได้

ประเภทระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถแบ่งประเภทย่อยลงไปได้อีก ตามตำแหน่งที่ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนี้

ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column electric power steering, column type-EPS) แสดงดังรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13 column electric power steering, column type-EPS
(ที่มา : https://www.jtekt.co.jp)

ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ตัวเฟืองขับ (pinion electric power steering, pinion type-EPS) แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 pinion electric power steering, pinion type-EPS
(ที่มา : https://www.jtekt.co.jp)

ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ตัวเฟืองสะพาน (rack electric power steering, rack type-EPS) แสดงดังรูปที่ 2.15

รูปที่ 2.15 rack electric power steering, rack type-EPS

(ที่มา : https://www.jtekt.co.jp)

ระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับคู่กับตัวเฟืองขับ (dual pinion type electric power steering, dual pinion type-EPS) แสดงดังรูปที่ 2.16

รูปที่ 2.16 dual pinion type electric power steering, dual pinion type-EPS

(ที่มา : https://www.jtekt.co.jp)

2.3 องค์ประกอบฮาร์ดแวร์ของระบบ

2.3.1 รถกอล์ฟไฟฟ้า

รูปที่ 2.17 รถกอล์ฟไฟฟ้า รุ่น GOLFER 2S

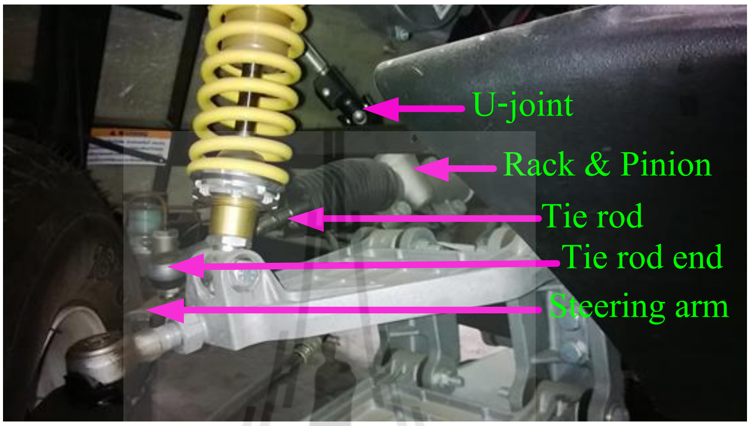
รถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของบริษัท เอส ดับเบิลยู แอนด์ซัน (sw & sons thailand. co. ltd.) ชื่อรุ่น GOLFER 2S ขนาด 2 ที่นั่ง แสดงดังรูปที่ 2.17 โครงสร้าง ช่วงล่างคล้ายรถโดยสารทั่วไปที่ใช้งานบนท้องถนน และคุณสมบัติโดยรวม เป็นดังนี้

- ขนาดของตัวรถ ความยาววัดจากระยะกึ่งกลางเพลาล้อหน้าถึงกึ่งกลางเพลาล้อหลังได้ 1.80 เมตร ความกว้างวัดระยะจากกึ่งกลางหน้ายางซ้ายถึงกึ่งกลางหน้ายางขวาได้ 1 เมตร
- รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดวัดได้ 3.5 เมตร
- รอบพวงมาลัยวัดจากเลี้ยวซ้ายสุดถึงเลี้ยวขวาสุดได้ 2.83 รอบ
- อัตราทดของการบังคับเลี้ยว (steering ratio) เท่ากับ 10.6 ต่อ 1 (สำหรับรถยนต์ทั่วไปมีค่าประมาณ 10 ถึง 20 ต่อ 1)
- มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน ขนาดแรงดัน 48 โวลต์
- แบตเตอรี่ขนาด 8V-150Ah จำนวน 6 ลูก
- พวงมาลัยควบคุมบังคับเลี้ยวอยู่ทางด้านขวา
- ช่วงล่างหน้าปีกนก พร้อมโช็คอัพคอยสปริง
- ช่วงล่างหลังแหนบ พร้อมโช็คอัพคอยสปริง

- ระบบห้ามล้อรถ แบบดิสเบรค 4 ล้อ (ระบบน้ำมัน)

- ยาง DURO 18 x 8.50 – 8 จำนวน 4 เส้น

ระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าติดตั้งจากโรงงาน เป็นแบบธรรมดา (manual) ที่ใช้กลไกแบบชุดเฟืองขับ และเฟืองสะพาน (rack & pinion) แสดงดังรูปที่ 2.18 โครงสร้างกลไกวิธีบังคับเลี้ยวแอ็คเคอร์แมน แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.18 กลไกแบบชุดเฟืองขับ และเฟืองสะพาน (rack & pinion) ของรถกอล์ฟไฟฟ้า

2.3.2 ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (EPS) พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) และอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)

การทำงานของชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าพร้อมชุดควบคุม (power steering ECU) และอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque Sensor) มีข้อมูลดังนี้

ชุดควบคุมนี้ ใช้แรงดันไฟฟ้า 11-14 โวลต์กระแสตรง รับสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด แล้วสั่งงานควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ขนาดแรงดันไฟฟ้า 11-14 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 10-55 แอมแปร์ อุปกรณ์รับรู้แรงบิด ใช้แรงดันไฟฟ้า 8 โวลต์กระแสตรง ที่จ่ายออกมาจากชุดควบคุม แล้วส่งค่าสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้า มีค่าไม่เกิน 5 โวลต์ กระแส 500 มิลลิแอมแปร์

เมื่อระบบบังคับเลี้ยวอยู่นิ่ง ไม่ว่าตำแหน่งของพวงมาลัยจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ตาม ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.3-2.7 โวลต์ แล้วถ้าหากผู้ขับขี่หมุนเลี้ยวพวงมาลัยไปทางซ้าย ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดจะมีค่าลดลง โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-2.3 โวลต์ (ในขณะที่กำลังหมุนพวงมาลัยเลี้ยวเท่านั้น) และเมื่อผู้ขับขี่หยุดหมุนพวงมาลัย ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดจะมีค่าเพิ่มกลับขึ้นมาเท่าเดิม ที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.3-2.7 โวลต์ ส่วนเมื่อผู้ขับขี่หมุนเลี้ยวพวงมาลัยไปในทางด้านขวา ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดจะมีค่า

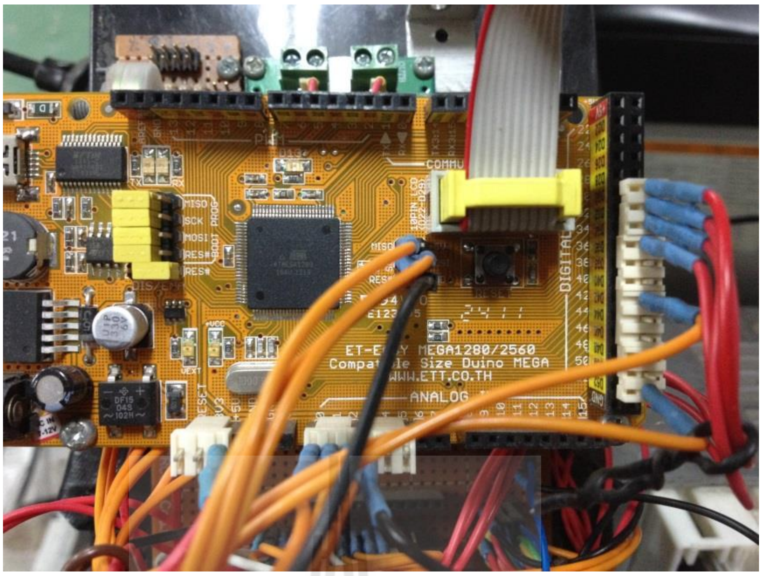
เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-4.7 โวลต์ (ในขณะที่กำลังหมุนพวงมาลัยเลี้ยวเท่านั้น) และเมื่อผู้ขับขี่หยุดหมุนพวงมาลัย ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดจะมีค่าลดลงกลับมาเท่าเดิม ที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.3-2.7 โวลต์

2.3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller : MCU) คือ หน่วยประมวลผลกลาง หรือ ไมโครคอมพิวเตอร์ หรือมอดูลไอซีควบคุม ทำหน้าที่ประมวลผล โดยรับอินพุต ประมวลผล แล้วส่งเอาท์พุตออกมา สำหรับงานวิจัยนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์มีบทบาทสำคัญมาก ซึ่งถูกนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์หลัก เริ่มตั้งแต่ การเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) การคำนวณปรับเทียบค่ามุมเลี้ยว การเก็บค่ามุมเลี้ยว การประมวลผลการควบคุมแบบพีไอ การรับ-ส่งค่าจากคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

มอดูลที่เลือกใช้ คือ มอดูล ET-EASY MEGA 1280 แสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นของบริษัท อีทีที ใช้ชิพ AVR เบอร์ ATMEGA 1280 โดยมีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกันกับ arduino mega และคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่

- ใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- รองรับการพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ arduino ตามแบบ arduino mega
- ใช้ USB bridge ของ FTDI เบอร์ FT232RL ซึ่งสามารถโปรแกรมจากพอร์ต USB ได้เอง
- 54 pin digital I/O โดยสามารถโปรแกรมเป็น PWM ได้ 14 pin
- รองรับการใช้งานกับ external supply ทั้ง AC และ DC ขนาด 7-20 โวลต์ ในกรณีใช้กระแสไม่เกิน 500mA สามารถใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB ได้ โดยมีวงจรเลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ ซึ่งจะตัดไฟเลี้ยงจาก USB โดยอัตโนมัติ เมื่อมีการต่อแหล่งจ่ายจากภายนอก

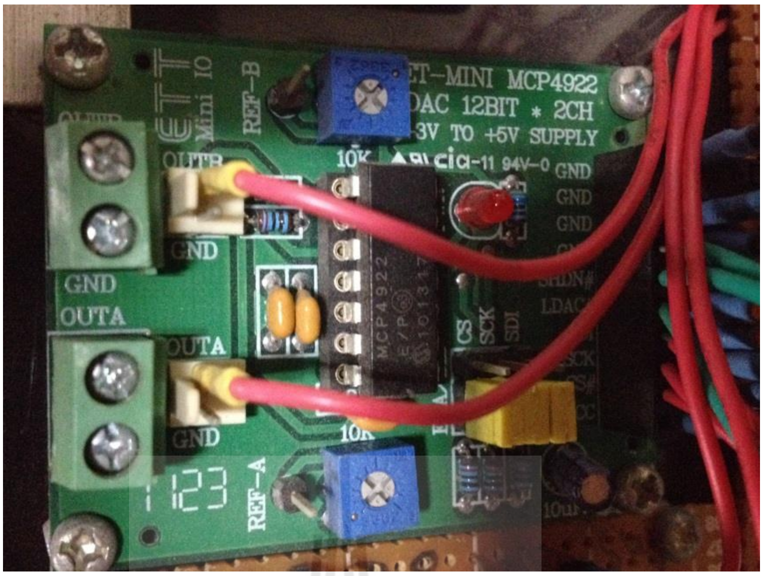


รูปที่ 2.19 มอดูลไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA 1280

2.3.4 มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ในการจ่ายค่าแรงดันจำลองให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณเสมือนสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) เลือกใช้การแปลงสัญญาณดิจิทัล ให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยมอดูล ชื่อ ET-MINI MCP4922 DAC แสดงดังรูปที่ 2.20 มีคุณสมบัติดังนี้

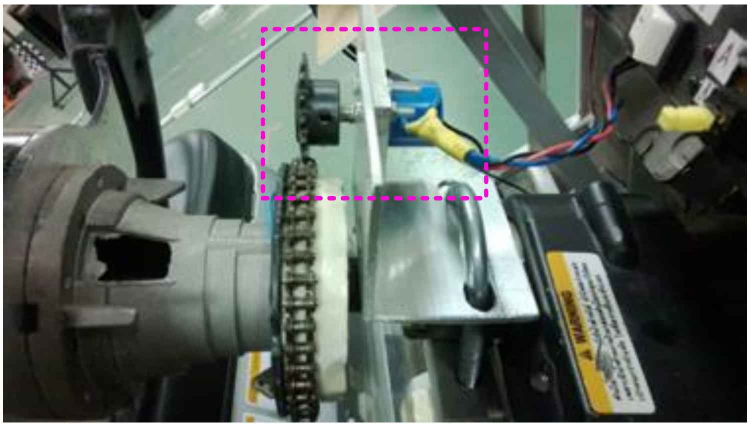
- ขนาดความละเอียดที่ 12 บิต
- แรงดันอ้างอิงสามารถปรับจาก VR ได้ตั้งแต่ 0 ถึง Vcc
- แหล่งจ่าย 2.7 โวลต์ ถึง 5.5 โวลต์
- ส่งข้อมูลดิจิทัลอินพุต ด้วย SPI รองรับสัญญาณนาฬิกาได้ถึง 20 MHz
- มีเอาต์พุต 2 ช่อง และสามารถเลือกเกณฑ์ขยายสัญญาณได้ 1x หรือ 2x



รูปที่ 2.20 มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (digital to analog)
ET-MINI MCP4922 DAC

2.3.5 เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสัญญาณป้อนกลับของระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่มีลักษณะการทำงานแบบหมุน 10 รอบ (variable resistor : VR) ขนาดความต้านทานเท่ากับ 1K โอห์ม แล้วจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันขนาด 5 โวลต์ เข้าไปที่ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้นี้ เพื่อสร้างวงจรแบ่งแรงดันขึ้นมา เลือกใช้ตัวต้านทานแบบปรับตัวได้ แสดงดังรูปที่ 2.21



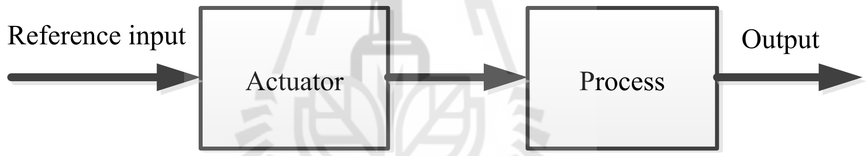
รูปที่ 2.21 เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว (steering angle sensor)

2.4 ระบบควบคุม

การควบคุม (control) คือ กระบวนการกำกับ หรือบังคับให้ระบบที่ต้องการควบคุมดำเนินงานตามที่ต้องการ ซึ่งระบบที่ถูกควบคุมนั้น จะผลิตเอาต์พุต หรือการตอบสนอง (response) ตามความประสงค์ การดำเนินงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการควบคุม สามารถดำเนินงานได้หลากหลายรูปแบบ หนึ่งในนั้นคือการอาศัยการป้อนกลับ (feedback) ซึ่งหมายถึงการเฝ้าตรวจ วัดค่าตัวแปรในระบบที่เป็นเอาต์พุต หรือการตอบสนอง และนำข้อมูลเกี่ยวกับตัวแปรนั้นไปใช้ประโยชน์ในการปรับระดับการควบคุมระบบให้ได้ตามความต้องการ

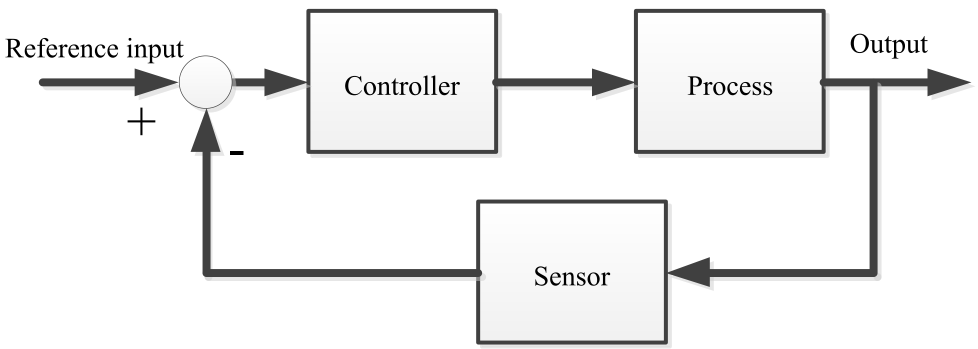
วิศวกรรมระบบควบคุม (control engineering) มีรากฐานมาจากทฤษฎีการป้อนกลับ และการวิเคราะห์ระบบแบบเชิงเส้น นอกจากนั้นยังรวมเอาทฤษฎีโครงข่าย การสื่อสาร ระบบดิจิทัล และไมโครโปรเซสเซอร์ มาใช้ประโยชน์ด้วย โครงสร้างของระบบที่จัดให้มีการควบคุม มีทั้งระบบควบคุมแบบวงเปิด และระบบควบคุมแบบวงปิด

การควบคุมแบบวงเปิด (open-loop control) ใช้ตัวขับเร้า (actuator) ในการควบคุมกระบวนการ(Process)โดยตรง แสดงแผนภาพการควบคุมแบบวงเปิดดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด

การควบคุมแบบวงปิด (close-loop control) มีการนำผลการตอบสนองป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิง เพื่อปรับแต่งการทำงานของกระบวนการ แสดงแผนภาพการควบคุมแบบวงปิดดังรูปที่ 2.23

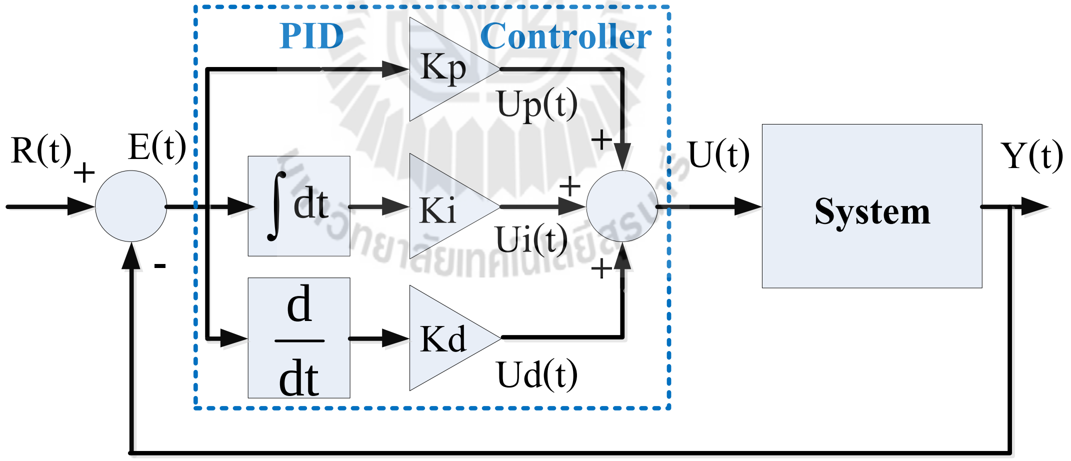


รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด

2.4.1 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีเป็นชื่อของตัวควบคุมอันทรงประสิทธิภาพ โดยชื่อของตัวควบคุม พี คือตัวอักษร P ซึ่งเป็นตัวอักษรตัวแรกของคำว่า proportional หมายถึง การปรับสัดส่วนสัญญาณ ไอ คือ ตัวอักษร I ซึ่งเป็นอักษรตัวแรกของคำว่า integral หมายถึง การอินทิเกรทสัญญาณ และ ดี คือ ตัวอักษร D ซึ่งเป็นอักษรตัวแรกของคำว่า derivative หมายถึงการอนุพันธ์สัญญาณ สัญญาณจากกลไกทั้งสาม ถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสัญญาณอย่างเหมาะสม ให้เกิดผลการควบคุมอย่างอัตโนมัติ ในการใช้งานตัวควบคุม อาจไม่ได้กลไกทั้งสามพร้อมกันทีเดียว สาเหตุที่กลไกเหล่านี้เมื่อทำงานผสมผสานกัน แล้วให้เกิดผลดีต่อการควบคุมระบบ ก็เพราะตัวควบคุมพีไอดี เสมือนกับเป็นตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหน้าต่อผสมแบบอนุกรมอยู่กับตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง ซึ่งตัวชดเชยแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีของตัวมันเอง และใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะที่แตกต่างกันในการชดเชยพลวัตของระบบ

ซึ่งระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการควบคุม แสดงแผนผังระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีตามรูปภาพที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปเวลาต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (1)

$$
\begin{aligned}
U(t) &= U_p(t) + U_i(t) + U_d(t) \\
&= K_p E(t) + K_i \int E(t)dt + K_d \frac{dE(t)}{dt}
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

โดยที่ $U(t)$ คือ สัญญาณของตัวควบคุมพีไอดี
K_p คือ เกนของตัวควบคุมพี
K_i คือ เกนของตัวควบคุมไอ
K_d คือ เกนของตัวควบคุมดี
$E(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

ระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีประกอบด้วยตัวควบคุมพี (proportional : P) ตัวควบคุมไอ (integral : I) ตัวควบคุมดี (derivative : D) โดยมีอัตราขยาย หรือเกน K_p K_i และ K_d เป็นตัวแปรของตัวควบคุม ผลของเกนหรืออัตราขยายต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

K_p คือ อัตราขยายในส่วนของตัวควบคุมพี โดยเอาต์พุตของตัวควบคุมพี (U_p) จะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน ($E(t)$) หากค่า K_p มีค่ามาก จะทำให้ U_p มีค่ามากด้วย ซึ่งส่งผลทำให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น แต่หากมีค่ามากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการพุ่งเกิน (over shoot) ซึ่งจะส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ แต่หากมีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้ช้าลงหรือไม่เข้าสู่เป้าหมายเลย

K_i คืออัตราขยายของตัวควบคุมไอ เป็นตัวช่วยให้ระบบขจัดหรือลดค่าความคลาดเคลื่อน หาก K_i มีค่ามากเกินไปจะทำให้ระบบเกิดการพุ่งเกิน (over shoot) ซึ่งส่งผลให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้ช้าลงด้วย และหาก K_i มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ระบบเข้าสู่เป้าหมายได้ช้าเช่นเกิน

K_d คืออัตราขยายของตัวควบคุมดี K_d แปรผันตรงกันการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนจะทำหน้าที่ลดการพุ่งเกินและลดระยะเวลาของระบบที่มีเวลาการหน่วง (delay time) แต่หากมีขนาดใหญ่จนเกินจะทำให้ระบบเกิดการพุ่งเกินได้เช่นกัน

ส่วนประกอบของระบบสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

1) สัญญาณอ้างอิง (reference signal: R(t) หรือ set-point) คือ สัญญาณอินพุตของระบบเพื่อกำหนดเป้าหมาย

2) ตัวควบคุม (controller) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมให้ระบบมีผลลัพธ์ตามต้องการ

3) สัญญาณควบคุม (control command: U(t)) คือ เอาต์พุตของตัวควบคุม ซึ่งเกิดจากการรวมกันของพจน์ เอาต์พุตของตัวควบคุมพี ($U_p(t)$) เอาต์พุตของตัวควบคุมไอ($U_i(t)$) และ เอาต์พุตของตัวควบคุมดี($U_d(t)$)

4) กระบวนการหรือระบบ (system, process, plant) ที่ต้องการควบคุม

5) ผลการควบคุม (output: Y(t))

6) ค่าความคลาดเคลื่อนหรือผลต่างของการควบคุม $E(t) = R(t) - Y(t)$

เนื่องจากสมการ (1) อยู่ในรูปของสมการต่อเนื่อง สามารถนำสมการต่อเนื่องมาสร้างเป็นสมการใหม่ ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) เพื่อสำหรับการนำไปเขียนโปรแกรมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ ด้วยการแปลงจากสมการต่อเนื่องทางเวลา เป็นสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยการแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนเอส (s) แล้วแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนแซด (z) และสุดท้ายแปลงให้อยู่ในรูปสมการผลต่าง สามารถแยกคิดแต่ละพจน์ดังนี้

การแปลงแซดด้วยวิธี backward difference ซึ่งใช้การประมาณค่าผลต่าง (differential approximation) แบบ backward difference method แสดงดังนี้

พิจารณาพจน์พี $U_p(t) = K_p E(t)$

แปลงลาปาซ $U_p(s) = K_p E(s)$

แปลงแซด $U_p(z) = K_p E(s)$

แปลงแซดกลับ $U_p(i) = K_p E(i)$ (2.2)

พิจารณาพจน์ไอ $U_i(t) = K_i \int E(t)dt$

แปลงลาปาซ $U_i(s) = \frac{K_i}{s} E(s)$

แปลงแซด $(\frac{1}{s} = \frac{T}{(1 - z^{-1})})$

$$U_i(z) = K_i(\frac{T}{1-z^{-1}})E(z)$$

$$(1-z^{-1})U_i(z) = K_i TE(z)$$

$$U_i(z) = K_i TE(z) + z^{-1}U_i(z)$$

แปลงแซดกลับ $$U_i(i) = K_i TE(i) + U_i(i-1) \quad (2.3)$$

พิจารณาพจน์ดี $$U_d(t) = K_d \frac{dE(t)}{dt}$$

แปลงลาปาซ $$U_d(s) = K_d sE(s)$$

แปลงแซด() $(s = \frac{1-z^{-1}}{T})$

$$U_d(z) = K_d(\frac{1-z^{-1}}{T})E(z)$$

$$U_d(z) = \frac{Kd}{T}[E(z) - z^{-1}E(z)]$$

แปลงแซดกลับ $$U_d(i) = \frac{Kd}{T}[E(i) - E(i-1)] \quad (2.4)$$

เมื่อนำพจน์พีไอดีมารวมกันอีกครั้งจะได้สมการไม่ต่อเนื่องในรูปผลต่าง ดังนี้

$$U(t) = U_p(t) + U_i(t) + U_d(t)$$

เมื่อ $$U_p(i) = K_p E(i)$$

$$U_i(i) = K_i TE(i) + U_i(i-1)$$

$$U_d(i) = \frac{Kd}{T}[E(i) - E(i-1)]$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$U(t) = K_p E(i) + (K_i TE(i) + U_i(i-1)) +$$

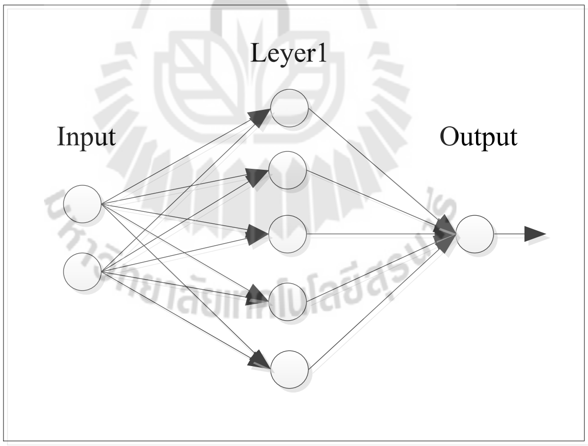
$$(\frac{Kd}{T}[E(i) - E(i-1)]) \quad (2.5)$$

T คือ sampling time

2.5 เครือข่ายประสาทเทียม

ความชาญฉลาดของสมองมนุษย์นั้นเป็นแรงบันดาลใจที่ยิ่งใหญ่ให้กับนักวิจัยที่พยายามศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อหาวิธีเลียนแบบกระบวนการการทำงานที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูงนี้ให้สามารถนำกระบวนการนั้นมาใช้ประโยชน์ให้กับตัวมนุษย์เอง จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาอัลกอริทึมเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านปัญญาประดิษฐ์

เครือข่ายประสาทเทียม คือ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายเสมือนการทำงานของสมองมนุษย์



รูปที่ 2.25 โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

2.5.1 ความหมายเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียม คือ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายเสมือนการทำงานของสมองมนุษย์ เครือข่ายประสาทเทียมมีคุณลักษณะคล้ายกับการส่งสัญญาณประสาทในสมองของมนุษย์ กล่าวคือ มีความสามารถในกระบวนการเรียนรู้ (learningprocess) และจัดเก็บอยู่ในโครงข่ายในรูปแบบค่าน้ำหนัก (weight) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เมื่อมีการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ ค่าน้ำหนักทำหน้าที่เปรียบเสมือนความรู้ที่รวบรวมไว้ การประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นใน

หน่วยประมวลผลย่อย เรียกว่า โหนด (node) ซึ่งโหนดเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์การส่งสัญญาณ (signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน (connection) จำลองมาจากการเชื่อมต่อของเดนไดร์ทและแอ็คซอนในระบบประสาทของมนุษย์ ภายในโหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (activationfunction) หรือฟังก์ชันการแปลง (transfer function) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในเซลล์ เครือข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ดังนี้

1. ข้อมูลส่งเข้า (input) เป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข หากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ ต้องแปลงให้อยู่ในรูปเชิงปริมาณที่โครงข่ายประสาทเทียมยอมรับได้

2. ข้อมูลส่งออก (output) คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง (actual output) จากกระบวนการเรียนรู้

3. ค่าน้ำหนักประสาท (weights) คือ ค่ากระบวนการเรียนรู้

4. ฟังก์ชันผลรวม (summation function: S) เป็นผลรวมของข้อมูลส่งเข้า (input) และค่าน้ำหนักประสาท (weights)

5. ฟังก์ชันการถ่ายโอน (transfer function) เป็นการคำนวณการจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียม เช่น ซิกมอยด์ฟังก์ชัน (sigmoid function) ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent function) ฟังก์ชั่นเส้นตรง (purelin function) เป็นต้น

2.5.2 ประวัติศาสตร์เครือข่ายประสาทเทียม

ปี พ.ศ. 2486 เครือข่ายประสาทเทียมถือกำเนิดในวงการวิทยาศาสตร์ โดยแม็คคัลลอช (McCulloch) และพิทส์ (Pitts) ได้เสนอแบบจำลองของเซลล์ประสาท และได้แสดงให้เห็นว่าในทางทฤษฎีนั้น โครงข่ายของแบบจำลองเซลล์ประสาทสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ต่อมาปี พ.ศ. 2492 โดนัลด์ เฮบบ์ (DonaldHebb) ได้เสนอผลงานวิจัยว่า การเรียนรู้ของสมองสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของการประกอบเซลล์ประสาทเข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย และได้เสนอกฎการเรียนรู้ของเฮบบ์ (hebb's rule) ที่ทำให้โครงข่ายของเซลล์ประสาทเทียมที่แม็คคัลลอชและพิทส์เสนอไว้ สามารถเรียนรู้ปัญหาง่าย ๆ ได้สำเร็จ การเรียนรู้ในรูปแบบของเฮบบ์บนเซลล์ประสาทเทียมของแม็คคัลลอชและพิทส์นั้น เป็นการเรียนรู้แบบ “ไม่มีผู้สอน” ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียนรู้ จะพยายามจัดกลุ่มข้อมูลที่โครงข่ายมองว่าคล้ายคลึงกันไปไว้ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งไม่เหมาะสมกับปัญหาประเภทที่ต้องมีการควบคุมกระบวนการเรียนรู้

ในช่วงปี พ.ศ. 2490 คอมพิวเตอร์ที่ทำงานเลียนแบบสมองเครื่องแรกของโลกถูกสร้างและทดสอบโดยมินสกี้ (Minsk) ซึ่งได้เสนอผลงานดังกล่าวในปี พ.ศ. 2511 ว่าเมื่อ

คอมพิวเตอร์ดังกล่าวได้รับการป้อนตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้เข้าไป ก็จะสามารถปรับอัตราการขยายสัญญาณในการเชื่อมโยงหรือ “ความแข็งแรงของการเชื่อมโยง” ระหว่างเซลล์ประสาทเทียมได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการแสดงการเรียนรู้ตัวอย่างที่ถูกป้อนเข้าไป

ในปี พ.ศ. 2501 (Garson. 1998) แฟรงค์ โรเซ็นแบลทท์ (Frank Rosenblatt) ได้พัฒนาลักษณะเครือข่ายประสาทเทียมขึ้นโดยใช้แบบจำลองของแม็คคัลลอชและพิทส์เป็นแนวทางรวมทั้งเสนอวิธีการเรียนรูแบบใหม่สำหรับลักษณะเครือข่ายประสาทเทียมด้วย เครือข่ายประสาทเทียมดังกล่าวเรียกว่า เพอร์เซพ ตรอน (perceptron) ซึ่งมีการเรียนรู้แบบ “มีผู้สอน” (supervised learning) โดยใช้การปรับความแข็งแรงของการเชื่อมโยง ซึ่งจะพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบความรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมกับความรู้ของ “ผู้สอน” (teacher) เพอร์เซพตรอนมีความเหมาะสมกับงานประเภท “การระบุชนิด” ซึ่งในระหว่างการเรียนรู้นั้น เพอร์เซพตรอนจะถูกสอนว่าข้อมูลตัวอย่างที่สอนเข้าไปแต่ละแบบนั้นจัดเป็นชนิดใดบ้างหากปัญหาและข้อมูลตัวอย่างมีความเหมาะสมเพอร์เซพตรอนจะสามารถระบุชนิดของข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อนได้ถูกต้อง

ในช่วงปี พ.ศ. 2500 เบอร์นาร์ด วิโดรว (Bernard Widrow) และมาร์เชียน ฮอฟฟ์ (MarcianHoff) ได้พัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือที่เรียกว่า อดาลีน (ADALINE; adaptive linear combiner) และกฎการเรียนรู้แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง เรียกว่ากฎการเรียนรู้ของวินโดรว-ฮอฟฟ์ (windrow-hofflearning rule) ที่เป็นการเรียนรู้แบบ “มีผู้สอน” ซึ่งในเวลาต่อมา อุปกรณ์เครื่องมือดังกล่าวได้รับการขยายแนวคิดไปเป็นมาดาลีน (MADALINE, many adalines) และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการรู้จำรูปแบบ (pattern recognition) การพยากรณ์อากาศ และระบบควบคุมที่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบไปตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

2.5.3 การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน ตัวอย่างในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การจำแนกรูปแบบ (pattern recognition) คือ การกำหนดหรือแปลงอินพุต เช่น การมองเห็นวัตถุ หรือการวิเคราะห์เสียงพูดเพื่อแปลความหมาย

2. การจัดกลุ่ม (clustering) และการจัดหมู่ (categorization) คือ การค้นหาสภาวะคล้ายที่พอเพียง แล้วแยกไว้ด้วยกัน เช่น การคัดแยกรูปแบบพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว

3. การประมาณค่าฟังก์ชัน (function approximation) ในทางปฏิบัติอาจมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์หาโครงสร้างของฟังก์ชัน จึงจำเป็นต้องใช้การประมาณค่าฟังก์ชั่น (ในกรณีที่ยอมรับได้)

4. การทำนาย (prediction) หรือการพยากรณ์ (forecasting) เช่น การทำนายราคาหุ้นของตลาดหลักทรัพย์ การพยากรณ์อัตราการไหลของน้ำ การพยากรณ์ราคาสินค้า เป็นต้น

5. การหาความเหมาะสม (optimization) เช่น การเลือกระยะทางที่ใกล้ หรือสั้นที่สุดในการเดินทาง (shortest path) การหาค่ามุมที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยว

6. หน่วยความจำอ้างอิงด้วยเนื้อหา (content-addressable memory) มีประโยชน์มากในงานด้านฐานข้อมูลแบบสื่อผสม

7. การควบคุม (control) เช่น การควบคุมระบบของเครื่องปรับอากาศ การควบคุมระบบเครื่องยนต์ และการควบคุมหุ่นยนต์ เป็นต้น

2.5.4 ประเภทของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

1. การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning)

ข้อมูลจะประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลที่ต้องการสอน และผลลัพธ์ที่ต้องการให้เครือข่ายสร้างขึ้น เมื่อมีการนำข้อมูลในลักษณะเดียวกันมาเป็นข้อมูลส่งเข้า เครือข่ายจะกำหนดค่าผลลัพธ์ที่เป็นเป้าหมายให้กับข้อมูลป้อนเข้าแต่ละตัวเครือข่ายจะนำค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่ได้ มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักประสาท เพื่อให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด ตัวอย่างได้แก่ การแพร่กลับ (backpropagation) และเพอร์เซ็บตรอน (perceptron) เป็นต้น

2. การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning)

การเรียนรู้แบบนี้จะสอนเครือข่ายโดยการนำข้อมูลส่งเข้าอย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว ไม่มีการส่งค่าผลลัพธ์เป้าหมายให้กับข้อมูลป้อนเข้าแต่ละตัว การปรับน้ำหนักจะใช้ข้อมูลที่นำมาสอนเป็นตัวปรับค่า โดยค่าน้ำหนักจะปรับตามกลุ่มที่ข้อมูลป้อนเข้าที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกัน ตัวอย่างได้แก่ แบบจำลองทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (adaptive resonance theory neural networks: ART) เป็นต้น

2.5.5 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ

เมื่อปลายทศวรรษที่ 80 มีการนำอัลกอลิทึมแพร่กลับ (backpropagation) มาพัฒนาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย และปี ค.ศ. 1986 การนำเสนอของ Rumelhart ทำให้อัลกอลิทึ่มแพร่กลับ (backpropagation) ได้รับความนิยมอย่างมาก ซึ่งในเวลาต่อมา เครือข่ายไปข้างหน้า (feedforward) แบบหลายชั้นที่มีการฝึกสอนโดยใช้อัลกอลิทึ่มแพร่กลับถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย จนถึงปัจจุบัน

อัลกอริทึมแพร่กลับ สถาปัตยกรรมเครือข่ายไปข้างหน้า (feed forward) แบบหลายชั้นที่มีการฝึกสอน โดยใช้อัลกอริทึมแบบแพร่กลับ (back-propagation) ในการเรียนรู้ หากพิจารณา

เครือข่าย N ชั้น เอาต์พุตของชั้นนั้นจะเป็นอินพุตให้ชั้นถัดไป แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.6 และฟังชั่นถ่ายโอนที่ใช้ดังแสดงในสมการ 2.3, 2.4, 2.5

$$y^{l+1} = f^{l+1}(W^{l+1}y^{l} + b^{l+1}) \quad (2.6)$$

โดยที่ l คือ ชั้น (layer) มีค่าตั้งแต่ 0,1,2,…,N-1

(เมื่อ l =0 แล้ว $y^0 = p$)

p คือ อินพุตของเครือข่าย

y^l คือ เอาต์พุตของเครือข่ายชั้นที่ l

f^l คือ ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของเครือข่ายชั้นที่ l

W^l คือ น้ำหนักประสาทของเครือข่ายชั้นที่ l

b^l คือ ไบอัสของเครือข่ายชั้นที่ l

y^N คือ เอาต์พุตของเครือข่าย

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนซิกมอยแบบลอการิทึม

$$y = \frac{1}{1+e^{-1}} \quad (2.7)$$

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเปอร์โบลาร์

$$y = \frac{e^{n} - e^{-n}}{e^{n} + e^{-n}} \quad (2.8)$$

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเส้นตรง

$$y = n \quad (2.9)$$

โดยที่ y คือ เอาต์พุตของฟังชั่นถ่ายโอน

n คือ อินพุตของฟังชั่นถ่ายโอน

2.5.6 การเรียนรู้ด้วยตนเองโดยทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (self-learning by adaptive resonance theory: ART)

เครือข่าย ART พื้นฐาน ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัวได้ (adaptive resonance theory :ART) นำเสนอโดย Gail Carpenter และ Stephen Grossberg [Carpenter and Grossberg, 1987] เป็นการเรียนรู้แบบแข่งขันอย่างหนึ่ง (ไม่ต้องมีผู้ฝึกสอน) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาทวิบทของเสถียรภาพหรือสภาพพลาสติกได้ โดยปรับให้เครือข่ายยอมรับและปรับต้นแบบกลุ่มที่เครือข่ายเรียนรู้ไว้แล้ว ก็ต่อเมื่ออินพุตมีความคล้ายอย่างพอเพียงกับต้นแบบนั้นๆ แต่หากอินพุตไม่มีความคล้ายที่พอเพียงกับต้นแบบใดๆที่เรียนรู้ไว้ เครือข่าย ART ก็จะสร้างกลุ่มใหม่ขึ้นมาโดยใช้

รูปแบบอินพุตนั้นเป็นต้นแบบ ซึ่งความคล้ายที่พอเพียงดังกล่าวจะตัดสินจากพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance parameter)

เครือข่าย ART-1 จากสถาปัตยกรรมการทำงาน ของเครือข่าย ART-1 ประกอบด้วยชั้นของนิวรอล 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นเปรียบเทียบ (comparison layer) และชั้นจดจำ (recognition layer) ค่าน้ำหนักประสาทระหว่าง 2 ชั้นนี้สามารถปรับค่าได้ทั้ง 2 ทิศทาง กล่าวคือ จากชั้นเปรียบเทียบไปยังชั้นจดจำ หรือจากชั้นจดจำไปยังชั้นเปรียบเทียบ การทำงานในชั้นจดจำใช้หลักการผู้ชนะได้หมด (winner-take-all) ในการเลือกปรับนิวรอลผู้ชนะ กล่าวคือ ถ้าเวกเตอร์อินพุตผ่านการทดสอบพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance parameter) ซึ่งมีความคล้ายกับรูปแบบอินพุตมากที่สุดเพียงนิวรอลเดียวเท่านั้น ที่จะได้รับการปรับค่าน้ำหนักประสาท การฝึกสอนเครือข่าย ART มี 2 แบบ ได้แก่ การเรียนรู้แบบช้า และการเรียนรู้แบบเร็ว ทั้ง 2 แบบ มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ในแบบการเรียนรู้ช้า จำนวนรอบการสอนจะต้องมากขึ้น แต่ปริมาณการคำนวณของการเรียนรู้แบบช้าจะมีน้อยกว่าการเรียนรู้แบบเร็ว เครือข่าย ART-1 มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนกว่าเครือข่าย SOFM ความสามารถในการค้นหารูปแบบใหม่ของอินพุตโดยที่สูญเสียความทรงจำในหน่วยความจำ ทำให้เครือข่าย ART สามารถเรียนรู้และค้นพบข้อมูลโดยไม่ต้องมีการฝึกสอนได้

การเรียนรู้ของเครือข่าย ART หรือการปรับค่าน้ำหนักประสาท สามารถทำได้ตามความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

สมการการปรับค่าน้ำหนักประสาท

$$nw = (l_r * i_p) + ((1 - l_r) * w) \tag{3.0}$$

โดยที่ nw คือ ค่าน้ำหนักประสาทใหม่

w คือ ค่าน้ำหนักประสาทเดิม

i_p คือ ค่าอินพุท

l_r คือ ค่าคงที่การเรียนรู้ มีค่า 0 ถึง 1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม และงานวิจัยที่น่าสนใจตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปโดยย่อได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network, ANN)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาใช้ในส่วนของการเรียนรู้ และจดจำ ซึ่งก็เป็นคุณสมบัติเด่นของเครือข่ายประสาทเทียม ในหัวข้อนี้นำเสนอตัวอย่างผลงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ได้มีการนำเครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยของ N. Kehtarnavaz and W. Sohn (1991) ได้นำเสนอระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะแบบอัตโนมัติด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งได้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาควบคุมระบบบังคับเลี้ยวแทนระบบควบคุมแบบเดิม ที่เป็นแบบการเดินตามแผนผัง ซึ่งการควบคุมแบบเดิมนี้ทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจาก ต้องประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับระบบ แต่หากใช้เครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาควบคุมแทนแล้ว ทำให้ระบบควบคุมนั้นมีความง่ายยิ่งขึ้น และใช้อัลกอลิทึ่มแบบแพร่กลับ ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการเรียนรู้ที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายที่สุด

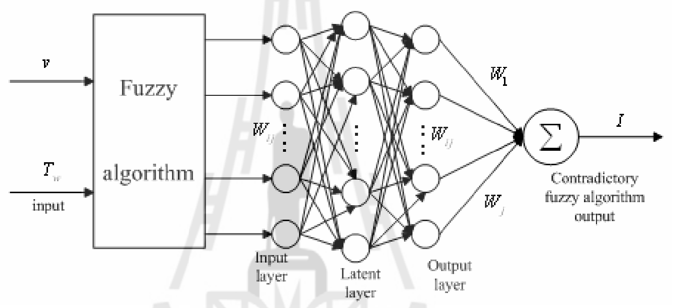
งานวิจัยของ Jae Ryoo and Cheol Lim (1999) ระบบ ได้เสนอวิธีการหาแบบจำลองของระบบบังคับเลี้ยว และแบบจำลองของระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งในการหาความสัมพันธ์ระหว่างภาพกับมุมเลี้ยวของรถ จะใช้ข้อมูลเบื้องต้นเป็นจุดบนเส้นขอบถนนข้างละ 4 จุด เป็นอินพุตของระบบแล้วใช้ระบบเครือข่าย

ประสาทเทียมในการคำนวณหามุมของพวงมาลัย โดยระบบเครือข่ายประสาทเทียมนั้นได้ใช้ระบบนิวโร – ฟัซซี เป็นตัวดำเนินการ ซึ่งระบบจะมี 8 อินพุต และ 2 เอาท์พุต คือระบบจำลองการเลี้ยวกับระบบจำลองการควบคุมความเร็ว ในขั้นต้นจะมีการฝึกสอนระบบด้วยตัวดำเนินการเรียนรู้แบบแพร่กลับ ในงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองการวิ่งของรถโดยใช้รถบังคับขนาดเล็กโดยใช้มอเตอร์เป็นตัวควบคุมการเลี้ยวแทนพวงมาลัย ซึ่งรถสามารถวิ่งบนเส้นทางจำลองที่สร้างขึ้นได้โดยรถไม่ออกนอกเส้นทาง

งานวิจัยของ Michael Olsen Darter and V. Scott Gordon (2005) นำเสนอระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบโมดูลาร์ โดยฝึกสอนระบบด้วยการคำนวณตำแหน่งด้านข้างล่วงหน้าให้กับยานพาหนะ ซึ่งสามารถลดค่าความผิดพลาดกลางลงได้ เมื่อนำมา

เปรียบเทียบกับเครือข่ายประสาทเทียมแบบเดี่ยว ในการฝึกสอนใช้ข้อมูลที่เป็นอินพุตได้แก่ ค่ามุมส่วนหัวของยานพาหนะ ตำแหน่งด้านข้างของยานพาหนะ มุมของวงพวงมาลัยที่สัมพันธ์กันกับการเลี้ยว รัศมีความโค้งของถนน และความเร็วของยานพาหนะ

งานวิจัยของ Huaiquan Zang and Min Liu (2007) นำเสนอระบบการควบคุมแบบพีไอดีฟัซซี-นิวรอลเน็ตเวิร์ค (PID-Fuzzy-NN) สำหรับการบังคับเลี้ยว ซึ่งเป็นระบบการควบคุมที่ได้นำฟัซซี มารวมกับนิวรอล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยทดลองผ่านทางโปรแกรมแมทแล็ประหว่างการควบคุมแบบพีไอดี กับการควบคุมแบบพีไอดีฟัซซี - นิวรอลแล้ว การควบคุมแบบอย่างหลังนี้จะให้ผลที่ดีกว่าอย่างแรก และการควบคุมแบบพีไอดีฟัซซี- นิวรอล ยังสามารถทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากไม่ต้องหาพารามิเตอร์พีไอดี ซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก



รูปที่ 2.26 โครงสร้างเครือข่ายแบบฟัซซี-นิวรอล (Huaiquan Zang and Min Liu (2007))

2.6.2 การขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยใช้วิธีป้อนกลับจากภาพ เริ่มมีการเผยแพร่ครั้งแรกในปีคริสต์ศักราช 1979 โดย J. Hill และ W.T. Park ในงานวิจัยเรื่อง การควบคุมแบบเวลาจริงสำหรับหุ่นยนต์กับกล้องแบบเคลื่อนที่ (Hill and Park, 1979) โดยในบทนำของงานวิจัยนี้ได้แนะนำคำศัพท์ "visual servoing" (การขับเคลื่อนเชิงภาพ) ขึ้นซึ่งเป็นการป้อนกลับตำแหน่งจากภาพเพื่อใช้ในการควบคุมปลายแขนกลที่สัมพันธ์กับวัตถุเป้าหมาย

ในปีคริสต์ศักราช 1985 Sanderson and Weiss ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง การควบคุมขับเคลื่อนเชิงภาพแบบพลวัตของหุ่นยนต์ การปรับตัวโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (dynamic visual servo control of robots: an adaptive image-based approach) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มีบทบาทสำคัญในยุคต้นของการขับเคลื่อนเชิงภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งพฤติกรรมการป้อนกลับด้วยภาพออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. การมองแล้วเคลื่อนที่ (static look and move)
2. การมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต (dynamic look and move)

3. การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้ตำแหน่ง (position based visual servoing)

4. การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (image based visual servoing)

การมองแล้วเคลื่อนที่ (static look and move) จะมีการทำงานแบบเป็นลำดับ กล่าวคือ ใช้กล้องในการมองเพื่อหาวัตถุ จากนั้นทำการขับเคลื่อนแขนกลให้เข้าสู่เป้าหมาย และหากทำกระบวนการนี้แบบซ้ำๆ เพื่อความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เรียกว่า การมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต (dynamic look and move) ส่วนการขับเคลื่อนเชิงภาพโดยใช้ตำแหน่ง (position based visual servoing) คือ การป้อนกลับด้วยภาพที่มีการทำงานโดยใช้ตำแหน่งในแกนอ้างอิงมาควบคุมการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมาย และส่วนการขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (image based visual servoing) นั้นจะทำงานโดยใช้พารามิเตอร์ในรูปภาพแทนตำแหน่งในแกนอ้างอิง และมักจะนิยามความคลาดเคลื่อนในรูปของพารามิเตอร์รูปภาพ (image parameter)

ต่อมาก็ได้มีนักวิจัยหลายๆ คนทำการวิจัยและทดลองที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) จนมีผลงานการวิจัยถูกนำเสนอออกมาอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อปีคริสต์ศักราช 1996 Seth Hutchinson and Gregory D. Hager and Peter I. Corke ก็ได้ทำการสรุปและรวบรวมแนวความคิดที่เกี่ยวกับงานด้านการขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) นี้ไว้ใน a tutorial on visual servo control ซึ่งถือได้ว่ามีเนื้อหาที่ครอบคลุมแนวความคิด ทฤษฎี และผลการทดลองต่างๆ ในยุคนั้นได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยของ J.K. Mukherjee (2004) นำเสนอการควบคุมแบบวิชวลเซอร์โวสำหรับยานพาหนะนำทางอัจฉริยะ ซึ่งได้นำการควบคุมแบบวิชวลเซอร์โว มาทำการทดลองใช้กับหุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ด้วยล้อ (mobile robot) เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้

ในงานวิจัยของ A. Saetang and A. Srikaew (2006) ได้นำเสนอตัวควบคุมสำหรับวิชวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ โดยสิ่งที่นำเสนอนี้เป็นเทคนิคในการควบคุมแบบใหม่เพื่อใช้ในการควบคุมขับเคลื่อนเชิงภาพ ซึ่งใช้ข้อมูลภาพที่ไม่ต้องทำการปรับเทียบ ทำให้ไม่ต้องการข้อมูลทางด้านจลนศาสตร์ และวิธีการใหม่นี้ใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัตเพื่อใช้ในการควบคุมขับเคลื่อนหุ่นยนต์แขนกลแบบ 4 องศาอิสระ โดยติดตั้งกล้องจำนวนสองตัวในการขับเคลื่อนเชิงภาพเพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมาย ซึ่งสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องทำการปรับเทียบทั้งกล้องและแขนกล

และงานวิจัยของ A. Srikaew and T. Somoon (2012) นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบการบังคับเลี้ยวด้วยภาพแบบอัตโนมัติโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม โดยใช้กล้อง

วีดีโอหนึ่งตัวเป็นเซ็นเซอร์อินพุต ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่งเป็นเซ็นเซอร์เอาต์พุต และใช้เครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีในการประมาณค่าของแบบจำลองการเลี้ยว งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการเลี้ยวสำหรับควบคุมการหมุนพวงมาลัยของยานพาหนะในสถานะรูปแบบการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่บนถนนทางตรง การเคลื่อนที่บนถนนทางโค้ง การเคลื่อนบนทางแยกเลี้ยวซ้ายและการเคลื่อนที่บนทางแยกเลี้ยวขวา ซึ่งแบบจำลองการเลี้ยวสามารถควบคุมยานพาหนะในการเคลื่อนที่ตามช่องทางเดินรถบนถนนได้โดยไม่หลุดออกจากถนน

2.7 สรุป

ในบทที่ 2 อธิบายถึงส่วนงานวิจัยด้านฮาร์ดแวร์ ที่เป็นอุปกรณ์เครื่องมือสำคัญของระบบควบคุมบังคับเลี้ยว ซึ่งอุปกรณ์เครื่องมือทางด้านฮาร์ดแวร์ที่สำคัญ ได้แก่ รถกอล์ฟไฟฟ้า ระบบบังคับเลี้ยว ไมโครคอนโทรลเลอร์ และชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เป็นต้น พร้อมทั้งนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของบริษัท เอส ดับเบิลยู แอนด์ซัน (sw & sons thailand. co. ltd.) ชื่อรุ่น Golfer 2S ขนาด 2 ที่นั่ง โครงสร้าง และช่วงล่างคล้ายรถโดยสารทั่วไปที่ใช้งานบนท้องถนน โดยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดแรงดัน 48 โวลต์

ระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ในรถยนต์ มีหลากหลายรูปแบบ ตามการใช้งานที่เหมาะสมกับรถยนต์หรือยานพาหนะ จากบริษัทผู้ผลิตหลายแห่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวของรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบเดิมที่เป็นแบบธรรมดาโดยใช้กลไกเฟืองขับเฟืองสะพาน (manual : rack & pinion) ให้เป็นระบบบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS)

ระบบควบคุม ที่กล่าวถึงได้แก่ การควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยอธิบายถึงการแปลงสมการการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งอยู่ในรูปสมการแบบต่อเนื่อง (continues equation) ให้เป็นสมการแบบขั้นเวลา (discrete time equation) เพื่อนำสมการดังกล่าวไปสร้างระบบการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ติดตั้งในรถกอล์ฟไฟฟ้า และใช้งานบนสภาพแวดล้อมถนนจริง

เครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครือข่ายสถาปัตยกรรมไปข้างหน้า (feed-forward network) กฎการเรียนรู้ของเครือข่ายเพอร์เซ็พตรอนแบบหลายชั้น (muti-layer perseptron) ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว กล่าวคือ ทิศทางจากอินพุตไปยังเอาต์พุต และอีกเครือข่ายใช้การเรียนรู้ด้วยตนเองโดยทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (self-learning by adaptive resonance theory)

บทที่ 3

การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 3 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เรื่อง การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม จะกล่าวถึง การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า ซึ่งกระบวนก่อนที่จะสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้านั้น คือ กระบวนการสร้างระบบด้านฮาร์ดแวร์ ส่วนประกอบหลักทางด้านฮาร์ดแวร์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่ รถกอล์ฟไฟฟ้า ชุดควบคุมบังคับเลี้ยว บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) บอร์ดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแอนะล็อก (D/A) เนื่องจากระบบบังคับเลี้ยวของรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งมาจากโรงงานไม่สามารถสร้างระบบควบคุมเข้าไปได้ จึงต้องดำเนินการสร้างระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าให้มีความสามารถในการรองรับการควบคุมแบบที่ต้องการได้ จากนั้นทำการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าขึ้นมา

รูปที่ 3.1 รถกอล์ฟไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 การปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า

ระบบบังคับเลี้ยวของรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งมาจากโรงงาน แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นแบบธรรมดา (manual) ที่มีกลไกการบังคับเลี้ยวแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann) พร้อมชุดการเปลี่ยนแรงหมุนเป็นแรงแนวเส้นตรงด้วยระบบเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack and pinion) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า เพื่อให้สามารถสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวได้ แนวทางในการปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า มี 2 แนวทาง ได้แก่ การสร้างกลไกการบังคับเลี้ยวขึ้นใหม่ และการเลือกชุดบังคับเลี้ยวรถยนต์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนำมาปรับแต่ง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แนวทางการเลือกชุดบังคับเลี้ยวรถยนต์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนำมาปรับแต่ง จากเหตุผล คือ เพื่อลดขั้นตอนและความซับซ้อนในการทำงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.2 ชุดบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งจากโรงงาน

3.2.1 แนวคิดในการเลือกชุดบังคับเลี้ยวสำหรับงานวิจัย

สำหรับแนวความคิดในการเลือกชุดบังคับเลี้ยวที่นำมาใช้ในงานวิจัย ในขั้นตอนแรก สิ่งที่ดำเนินการ คือ การศึกษาระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ในรถยนต์อย่างละเอียด ทั้งตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน หลังจากนั้นนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาพิจารณา แล้วเปรียบเทียบระหว่างชุดบังคับเลี้ยวรถยนต์ในแต่ละแบบกับระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งจากโรงงาน เพื่อหาจุดยอมรับและความเหมาะสมที่สุด ปัจจัยดังกล่าว ได้แก่

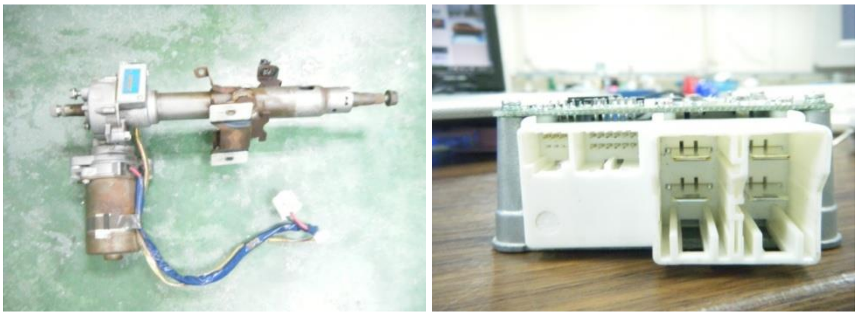
1. ด้านความปลอดภัย ซึ่งระบบความปลอดภัยเป็นสิ่งที่งานด้านวิศวกรรมต้องตระหนักเป็นอันดับหนึ่ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ก็เช่นเดียวกัน จึงเลือกที่จะนำระบบบังคับเลี้ยวที่ติดตั้งอยู่ในรถยนต์มาใช้ในงานวิจัย ด้วยเหตุผล คือ ระบบบังคับเลี้ยวที่ติดตั้งในรถยนต์แต่ละบริษัทนั้นได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นจากวิศวกรที่มีความชำนาญในด้านนั้นๆ โดยเฉพาะ พร้อมทั้งยังมีมาตรฐานรับรอง นอกจากนี้ความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึง คือ ความปลอดภัยในการใช้งานจริง

2. ด้านประสิทธิภาพในการทำงาน ในการพิจารณาเลือกชุดบังคับเลี้ยวในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในเรื่องประสิทธิภาพในการทำงานเป็นอันดับรองจากความปลอดภัย ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบบังคับเลี้ยวมีผลโดยตรงต่อผลของงานวิจัย เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยด้านฮาร์ดแวร์ ชุดกลไกการดำเนินการจึงต้องมีประสิทธิภาพในระดับที่สามารถยอมรับได้

3. ด้านลักษณะทางกายภาพ เนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้ง สิ่งที่พิจารณา ได้แก่ ขนาดและรูปร่าง กลไกการทำงานของชุดบังคับเลี้ยว ในด้านขนาดและรูปร่างต้องมีความใกล้เคียงกับชุดบังคับเลี้ยวชุดเดิม กลไกการทำงานต้องสามารถทำงานร่วมกับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี และที่สำคัญ คือ สามารถติดตั้งในรถกอล์ฟไฟฟ้าได้โดยง่าย รวมถึงไม่สร้างปัญหาให้กับระบบการทำงานอื่นๆ

4. ด้านค่าใช้จ่าย เป็นปัจจัยที่ขาดไม่ได้สำหรับการพิจารณา ค่าใช้จ่ายสำหรับชุดบังคับเลี้ยวที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ต้องไม่สูงจนเกินไป ดังนั้นจึงมุ่งเน้นไปที่อะไหล่มือสอง จากการเปรียบเทียบราคาแล้ว พบว่าราคาของอะไหล่มือสองถูกกว่าของใหม่ประมาณครึ่งหนึ่ง ซึ่งประสิทธิภาพของอะไหล่มือสองก็ยังอยู่ในระดับที่สามารถทำงานได้ดี

จากการพิจารณาด้วยปัจจัยด้านต่างๆ ที่กล่าวมา ชุดบังคับเลี้ยวที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS) แสดงในรูปที่ 3.3 เป็นโมเดลที่ผลิตขึ้นโดย กลุ่มบริษัท เจเทค (JTEKT) ซึ่งตัวมอเตอร์และชุดขับมอเตอร์ใช้ของกลุ่มบริษัท เด็นโซ่ (DENSO) และติดตั้งในรถยนต์ โตโยต้า ยาริส (TOYOTA YARIS) สำหรับประเทศไทย เป็นโมเดลปี 2006



รูปที่ 3.3 ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS) พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU)

3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งระบบบังคับเลี้ยว

ในขั้นตอนการติดตั้งระบบบังคับเลี้ยวต้องใช้ความพิถีพิถัน เนื่องจากจุดยึดสำคัญและข้อต่อต่างๆ ของระบบบังคับเลี้ยวต้องมีความเที่ยงตรง แม่นยำ ระบบจึงจะสามารถทำงานได้ตามประสิทธิภาพที่ต้องการได้ เนื่องจากชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) มีมอเตอร์ไฟฟ้าติดตั้งที่แกนพวงมาลัย ดังนั้นก่อนทำการติดตั้งจึงต้องจัดวางตำแหน่งที่จะติดตั้งให้มีความเหมาะสม ซึ่งขั้นตอนและวิธีการติดตั้งชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย เข้าไปแทนชุดบังคับเลี้ยวเดิมที่ติดตั้งจากโรงงาน เป็นดังต่อไปนี้

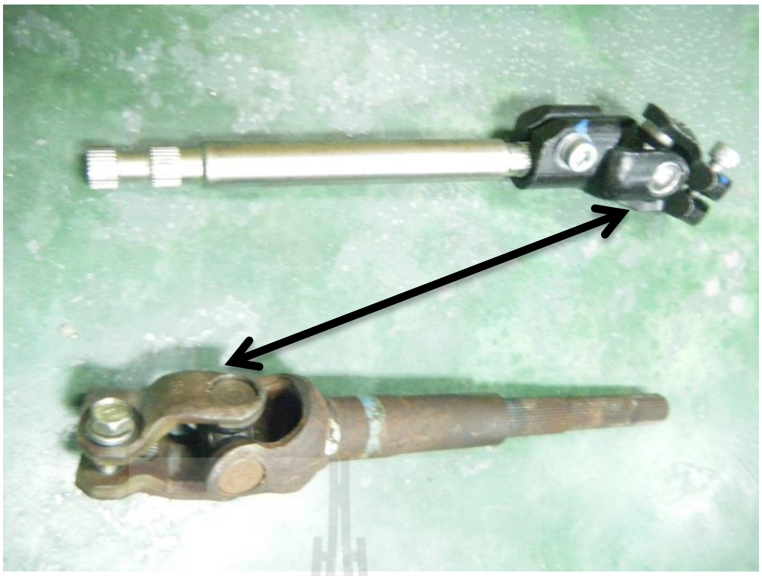
1. ถอดคอนโซล และที่วางของด้านหน้า พร้อมทั้งตัดแต่งคอนโซลที่ขัดขวางตัวมอเตอร์ไฟฟ้าชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS)

2. ทำการถอดชุดบังคับเลี้ยวชุดเดิมออก โดยเริ่มจากถอดน็อตยึดข้อต่ออ่อนและน็อตยึดแกนพวงมาลัย แสดงดังรูป 3.4 โดยยังคงเหลือข้อต่ออ่อน ข้อสุดท้ายที่ติดอยู่กับตัวเฟืองขับ (pinion) ชิ้นส่วนที่เหลือต่อจากนี้ ถอดออกหมด ตั้งแต่ แกนของชุดข้อต่ออ่อน ไปจนถึงพวงมาลัย แสดงชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งน็อตตัวผู้ (bolt) ยึดแกนพวงมาลัยที่ติดตั้งจากโรงงาน

รูปที่ 3.5 ชิ้นส่วนชุดบังคับเลี้ยว และแผงคอนโซลหน้าที่ถูกถอดออก

3. ทำการเปลี่ยนสลับหัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อน แสดงดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากขนาดเพลาแกนพวงมาลัยของชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) ใหญ่กว่าของเดิม จึงต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนหัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อน เพื่อให้ชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) สามารถเชื่อมต่อกับชุดเฟืองขับและเฟืองสะพาน (rack and pinion) ของรถกอล์ฟไฟฟ้าได้ แสดงดังรูปที่ 3.7



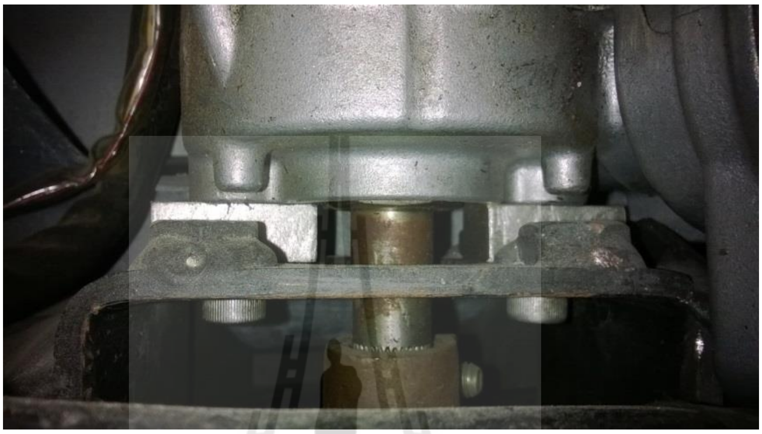
รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนหัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อนที่เปลี่ยนสลับกัน

รูปที่ 3.7 หัวจับยึดเพลาของข้อต่ออ่อนที่เปลี่ยนสลับเสร็จแล้ว

4. เจาะรูที่บริเวณที่ยึด ระหว่างชุดบังคับเลี้ยวกับโครงรถไฟฟ้า 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร

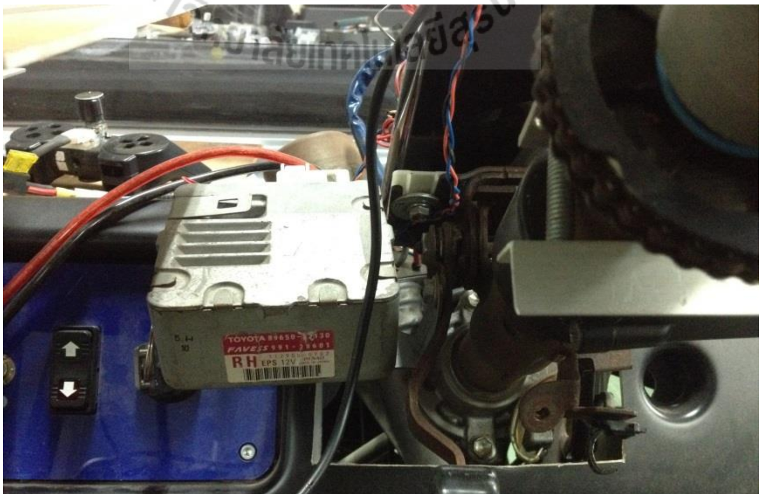
5. ตัดแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 12 มิลลิเมตร ขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และเจาะรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร

6. ใช้น็อตตัวผู้ (bolt) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ขันยึดชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) ติดกับโครงรถกอล์ฟไฟฟ้าไว้ โดยรองช่องว่างด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เตรียมไว้ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การยึดชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) ติดกับโครงรถไฟฟ้า

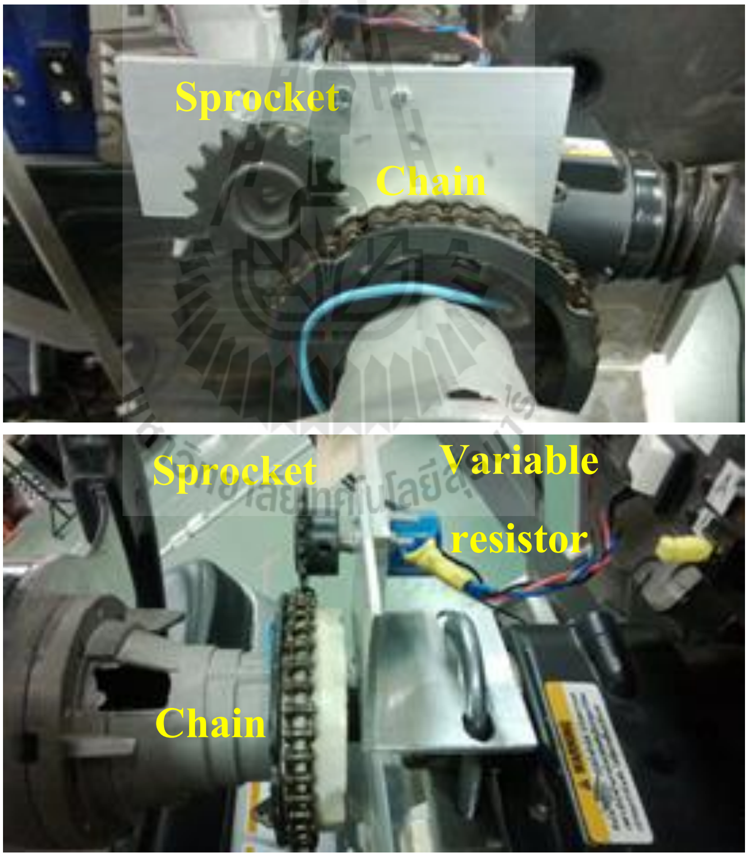
7. ติดตั้งชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) ที่ตำแหน่งใกล้กับชุดบังคับเลี้ยว เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อสายสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้งชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU)

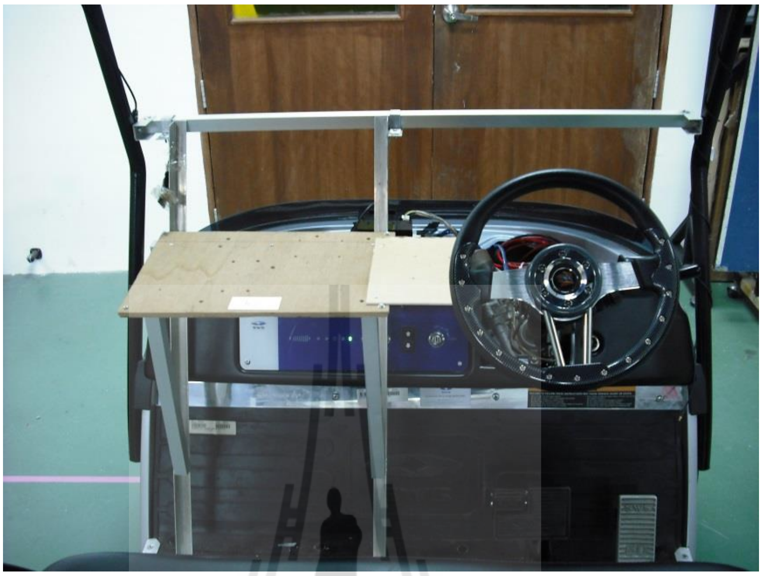
3.2.3 การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

ชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้ติดตั้งไว้ที่แกนหมุนส่วนบนของพวงมาลัย เนื่องจากสามารถติดตั้งได้ง่าย และเป็นตำแหน่งที่ไม่รบกวนการทำงานของระบบการทำงานส่วนอื่นของรถกอล์ฟไฟฟ้า ชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวเป็นแบบเฟืองขับสายโซ่ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ตัวเฟืองขับ และสายโซ่ ซึ่งตัวเฟืองขับจะถูกติดตั้งไว้กับแกนหมุนของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ และยึดติดตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ไว้ที่แกนพวงมาลัยเพื่อให้อยู่กับที่ โดยใช้ฉากอลูมิเนียมเจาะรู แล้วใช้น็อตตัวผู้แบบโค้งตัวยู (U-bolt) คล้องยึดติดไว้กับแกนพวงมาลัย ส่วนสายโซ่นั้นออกแบบให้มีลักษณะเป็นวงกลม และยึดติดคล้องรอบแกนหมุนของพวงมาลัย เพื่อให้สามารถหมุนไปตามพวงมาลัยพร้อมขบกับเฟืองโซ่ได้ แสดงรูปตำแหน่งการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 รูปตำแหน่งการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

3.3 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (C-EPS)



รูปที่ 3.11 รถกอล์ฟไฟฟ้าติดตั้งชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS)

หลังจากทำการติดตั้งชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) เสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.11 ทำการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ สายสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) และเชื่อมต่อสายสัญญาณมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) ข้อมูลจากคู่มือ (2007-toyota-yaris-repair-manual-27-power-steering) รถกอล์ฟไฟฟ้าได้เปลี่ยนระบบบังคับเลี้ยวจากแบบธรรมดา (manual) มาเป็นแบบช่วยแรง (power)

การทำงานของชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS) ของรถกอล์ฟไฟฟ้า เริ่มจากเมื่อผู้ขับขี่ออกแรงหมุนพวงมาลัย (steering wheel)ไปในทิศทางใด ทิศทางหนึ่ง แรงหมุนนั้นจะถูกส่งต่อไปที่แกนพวงมาลัย (column) ซึ่งยึดติดอยู่กับพวงมาลัย ทำให้แกนพวงมาลัยหมุนไปด้วย และอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) ที่ติดตั้งอยู่กับชุดแกนพวงมาลัยจะทำหน้าที่ในการตรวจจับแรงหมุนของผู้ขับขี่แล้วเปลี่ยนแรงหมุนนั้นเป็นแรงดันไฟฟ้า ทุกครั้งที่มีการหมุนพวงมาลัยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) และส่งสัญญาณนี้ไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า (EPS-ECU) ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุต จากนั้นชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าจะประมวลผล

แล้วส่งสัญญาณสั่งการไปที่มอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อช่วยแรงในการบังคับเลี้ยว ลักษณะการทำงานร่วมของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับชุดแกนพวงมาลัยเพื่อช่วยออกแรงในการบังคับเลี้ยว คือ แกนขับของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นแบบตัวหนอน (worm) และเฟืองตามเป็นเฟืองหนอน (worm gear) ซึ่งยึดติดอยู่กับแกนพวงมาลัย เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงาน ตัวหนอนขับเฟืองหนอน เพื่อส่งแรงหมุนช่วยที่แกนพวงมาลัย จากนั้นส่งแรงผ่านชุดข้อต่ออ่อนไปที่ชุดเฟืองขับเฟืองสะพาน (rack and pinion) เพื่อเปลี่ยนแรงหมุนเชิงมุมเป็นแรงเชิงเส้น แล้วส่งแรงเชิงเส้นนั้นผ่านคันชักคันส่ง (tie rod) ไปดันคอม้า (knuckle) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสุดท้ายยึดติดกับล้อ (wheel) จึงเกิดการเลี้ยวเปลี่ยนทิศทางตามทิศทางของการบังคับเลี้ยว แสดงระบบควบคุมการทำงานดังรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว (C-EPS) ของรถกอล์ฟไฟฟ้า

ความแตกต่างที่ชัดเจนของระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า ที่ได้เปลี่ยนจากแบบธรรมดา (manual) มาเป็นแบบช่วยแรง (power) คือ พวงมาลัยมีน้ำหนักที่เบากว่า ทำให้การบังคับเลี้ยวสามารถทำได้อย่างง่ายดาย และการบังคับเลี้ยวมีความแม่นยำมากขึ้น เพราะชุดบังคับเลี้ยว (C-EPS) มีระยะฟรีน้อยกว่าชุดบังคับเลี้ยวที่ติดตั้งจากโรงงาน

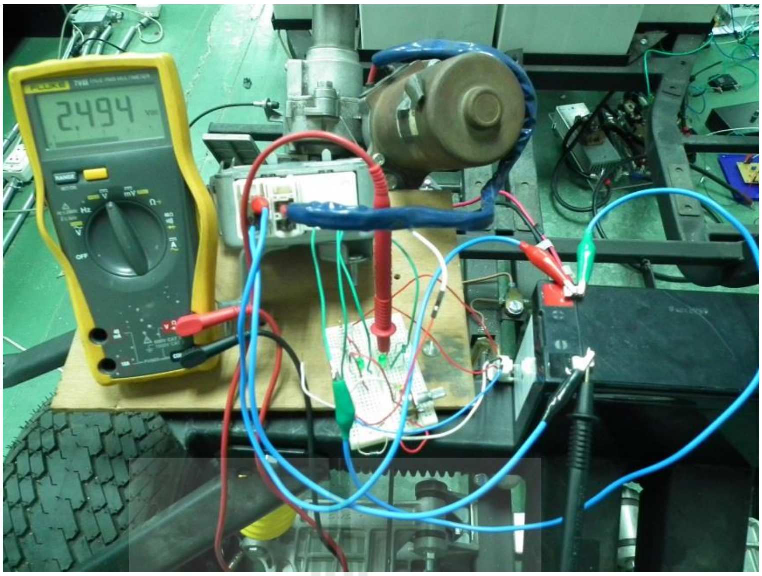
3.4 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

รูปที่ 3.13 การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

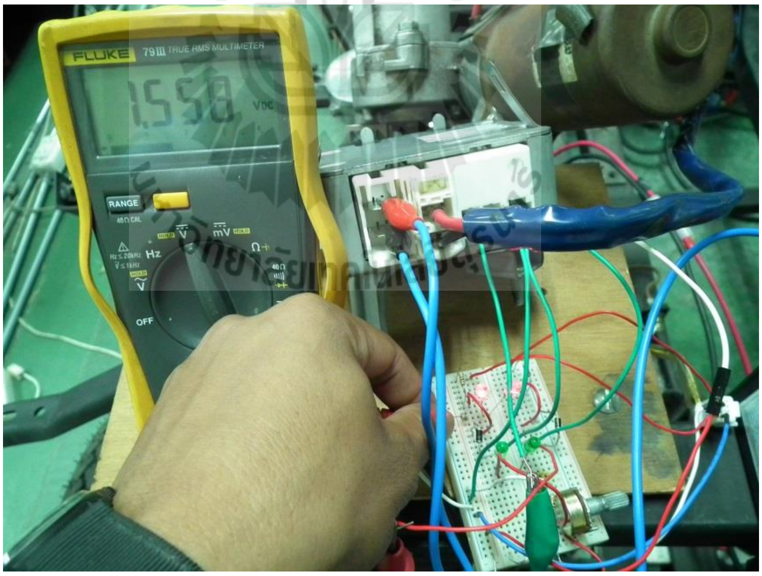
3.4.1 แนวคิดและสมมติฐานเบื้องต้น

แนวคิดและสมมติฐานเบื้องต้น เนื่องจากพิจารณาแล้วคิดว่าชุดควบคุมมอเตอร์ชุดนี้มีประสิทธิภาพในระดับที่สามารถใช้ติดตั้งอยู่ในรถยนต์ที่วิ่งอยู่บนท้องถนนทั่วไปได้ จึงคิดว่าน่าจะใช้ชุดควบคุมมอเตอร์ชุดนี้ โดยคิดหาวิธีในการที่จะเข้าไปกำหนดอินพุตให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ดังกล่าว แทนการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ขึ้นมาใหม่

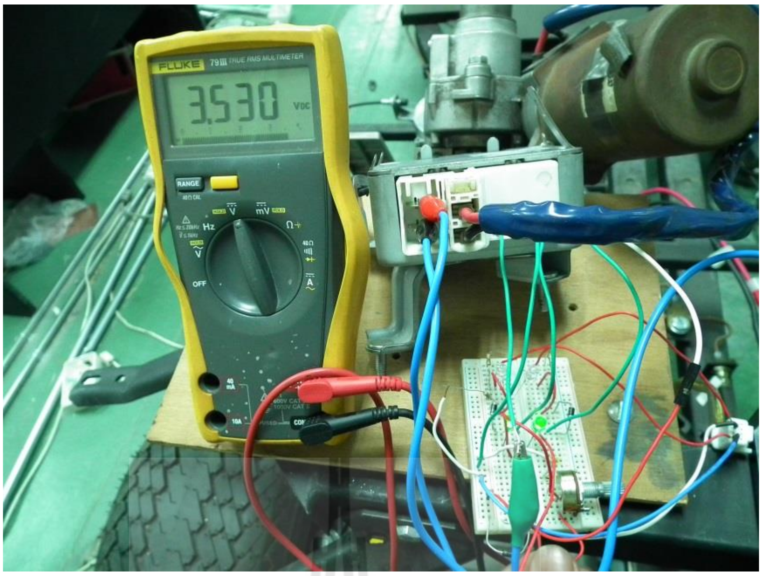
โดยในเบื้องต้นทำการทดลองสร้างการควบคุมแบบบังคับมือ โดยใช้ปุ่มกดเลี้ยวแบบปุ่มกดติด-ปล่อยดับ เพื่อควบคุมทิศทางการเลี้ยว เมื่อศึกษาข้อมูลจากคู่มือ (2007-toyota-yaris-repair-manual-27-power-steering) พร้อมทั้งทำการทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด ในขณะไม่มีการหมุนพวงมาลัย แสดงดังรูปที่ 3.14 ในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย แสดงดังรูปที่ 3.15 และในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวขวา แสดงดังรูปที่ 3.16 จนแน่ใจแล้วว่า ได้ค่าที่เท่ากันจริงตามคู่มือ แสดงตารางสรุปผลการวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.14 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) ในขณะไม่มีการหมุนพวงมาลัย



รูปที่ 3.15 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) ในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย



รูปที่ 3.16 การทดลองและวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor) ในขณะหมุนพวงมาลัยเลี้ยวขวา

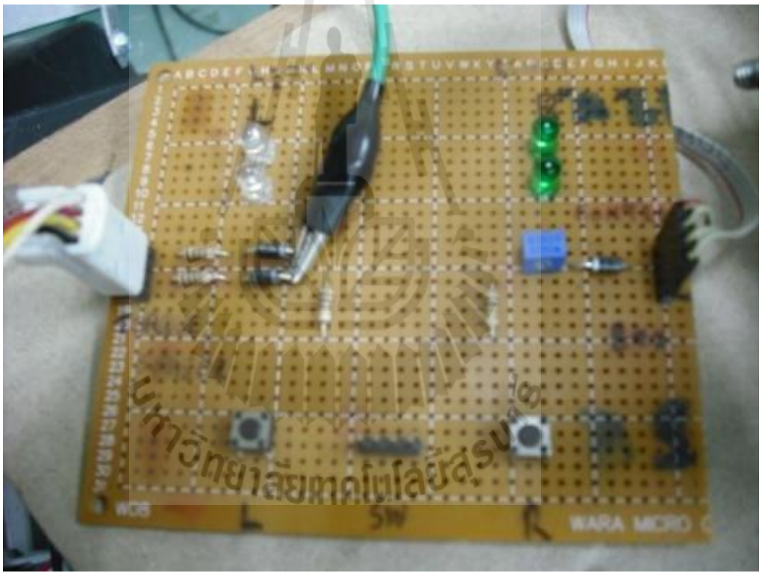
ตารางที่ 3.1 สรุปผลการทดลองวัดค่าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)

ผลการทดลองวัดค่าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด (torque sensor)			
การหมุนพวงมาลัย	ขณะเลี้ยวซ้าย	ไม่มีการเลี้ยว	ขณะเลี้ยวขวา
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	0.3-2.3	2.3-2.7	2.7-4.7

จากนั้นตั้งสมมติฐานเบื้องต้น ดังนี้

- เมื่อไม่มีการหมุนพวงมาลัย ให้ทำการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.4-2.7 โวลต์ แทนเข้าไปเป็นอินพุตให้กับชุดควบคุม
- หากต้องการให้มอเตอร์หมุนเลี้ยวซ้าย ให้ทำการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-2.3 โวลต์ แทนเข้าไปเป็นอินพุตให้กับชุดควบคุม
- หากต้องการให้มอเตอร์หมุนเลี้ยวขวา ให้ทำการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.7-4.7 โวลต์ แทนเข้าไปเป็นอินพุตให้กับชุดควบคุม

ทำการทดลองตามสมมติฐานเบื้องต้น จึงสร้างวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นขึ้นมา แสดงวงจรแบ่งแรงดันดังรูปที่ 3.17 เพื่อที่จะจำลองค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นค่าอินพุตให้กับชุดควบคุม แทนค่าสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเดียวกันกับที่จ่ายให้กับอุปกรณ์รับรู้แรงบิด ในการทดลองดังกล่าวใช้การเทียบเคียงค่าสัญญาณตามตารางที่ 1 และใช้การจ่ายค่าสัญญาณแบบคงที่ กล่าวคือ ทำการปรับตั้งค่าแรงดันเริ่มต้นของวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นไว้ที่ 2.5 โวลต์ เพื่อใช้สำหรับจ่ายไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการเลี้ยว การเลี้ยวซ้ายปรับค่าแรงดันเพื่อใช้สำหรับจ่ายไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อกดปุ่มเลี้ยวซ้ายไว้ที่ 1.5 โวลต์ การเลี้ยวขวาปรับค่าแรงดันเพื่อใช้สำหรับจ่ายไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อกดปุ่มเลี้ยวขวาไว้ที่ 3.5 โวลต์ แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.17 แสดงวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้น

ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นที่จ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นที่จ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า			
การควบคุมบังคับเลี้ยว	กดปุ่มเลี้ยวซ้าย	ไม่มีการเลี้ยว	กดปุ่มเลี้ยวขวา
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	1.5	2.5	3.5

ผลการทดลองเบื้องต้น คือ ยังไม่สามารถทำงานได้ จึงดำเนินการค้นหาสาเหตุ พบว่า ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ามีระบบการตรวจสอบการเชื่อมต่อของสายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองใหม่ โดยต่อสายสัญญาณดังกล่าวจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดเข้าไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย แต่การนำสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดเชื่อมต่อเข้าไปด้วยนั้น ต้องทำการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันเบื้องต้นใหม่ โดยเพิ่มไดโอดเข้าไปในวงจรเพื่อทำหน้าที่ต้านแรงดันไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดไว้ไม่ให้เข้ามาที่วงจร เพราะจากการทดสอบเบื้องต้น ชุดควบคุมตรวจสอบแค่การเชื่อมต่อเท่านั้น จากนั้นทำการทดสอบอีกครั้ง ผลที่ได้คือ สามารถควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้ปุ่มกดบังคับมือได้ ทั้งการเลี้ยวซ้าย และการเลี้ยวขวา แสดงรูปการทดลองตามสมมติฐานดังรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.18 การทดสอบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าในเบื้องต้นแบบใช้ปุ่มกด

3.4.2 การออกแบบ และการสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

หลังจากการทดสอบการควบคุมบังคับเลี้ยวเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ตั้งไว้แล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบ และการสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว โดยออกแบบให้ลักษณะการควบคุมบังคับเลี้ยวเป็นแบบหมุน เพื่อยังคงความรู้สึกในการควบคุมบังคับเลี้ยวให้ได้ใกล้เคียงกับแบบใช้พวงมาลัยปกติให้มากที่สุด พร้อมทั้งยังมีความสอดคล้องกันกับชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวที่มีลักษณะเป็นแบบหมุนเช่นเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความสะดวกและเข้าใจได้ง่ายในการกำหนดมุมเลี้ยวเป้าหมายอ้างอิง แสดงอุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยวแบบหมุน ดังรูปที่ 3.19

รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยว

ในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยวนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller : MCU) เบอร์ Atmega1280 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง โดยมีมอดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D) ขนาด 10 บิต ติดตั้งอยู่ภายในตัว และในการแสดงผลต่างๆ ทีอยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เลือกใช้การแสดงผลผ่านการเชื่อมต่อแบบอนุกรม (RS-232) และมอดูลจอแสดงผลแบบแอลซีดี (LCD) ในชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าชุดนี้ทำงานแปรผันตามสัญญาณของอุปกรณ์รับรู้แรงบิดที่ติดตั้งไว้ที่แกนหมุนของพวงมาลัย เพื่อให้ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยวสามารถจ่ายสัญญาณได้ครอบคลุมทุกช่วงการทำงานตามอุปกรณ์รับรู้แรงบิด ดังนั้นในการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเสมือนนี้ จึงออกแบบโดยใช้มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก เบอร์ MCP4922

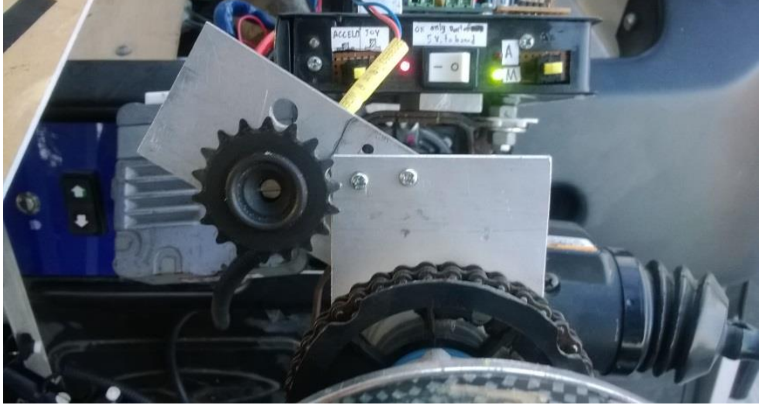
ขนาด 12 บิต เพื่อส่งสัญญาณเสมือนนี้เข้าไปที่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า พร้อมทั้งออกแบบให้โปรแกรมสามารถจ่ายค่าสัญญาณให้ได้ครอบคลุมทุกช่วงการทำงานตามอุปกรณ์รับรู้แรงบิด

การออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว เริ่มต้นจากการวัดมุมเลี้ยวของล้อคู่หน้าโดยกำหนด เมื่อล้อคู่หน้าตั้งอยู่หน้าตรงไม่มีการหักเลี้ยวไปข้างใดข้างหนึ่ง กำหนดมุมให้เป็น 0 องศา มุมเลี้ยวซ้ายให้เป็นมุมติดลบ และมุมเลี้ยวขวาให้เป็นมุมบวก จากการพบว่า เมื่อหมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้ายสุดวัดมุมเลี้ยวได้เท่ากับ -46 องศา และเมื่อหมุนพวงมาลัยเลี้ยวขวาสุดวัดมุมเลี้ยวได้เท่ากับ 50 องศา จากนั้นทำการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์เข้าไปที่เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว พร้อมทั้งเชื่อมต่อสายสัญญาณเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวเข้าไปที่ช่อง A/D ของไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วแสดงผลค่าตัวเลขดิจิทัลขนาด 10 บิต (0-1023) ผ่านมอดูลจอแสดงผลแอลซีดี ในการปรับเทียบค่าใช้ค่ามุมล้อคู่หน้าเป็นหลักตั้งต้น โดยมีขั้นตอนการปรับเทียบดังนี้

1. กำหนดหมุนพวงมาลัยให้ล้อคู่หน้าตั้งอยู่หน้าตรงไม่มีการหักเลี้ยวไปข้างใดข้างหนึ่ง กำหนดมุมเลี้ยวนี้ให้เป็น 0 องศา

2. หมุนปรับเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว (ประมาณ 5 รอบจากหมุนสุดเริ่มต้น) เพื่อให้ได้ค่าที่อยู่ตรงกลางของเซ็นเซอร์ ค่าตรงกลางตัวเลขดิจิทัลขนาด 10 บิต จะมีค่าประมาณ 511-512 บันทึกค่าจากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว (สามารถใช้มือเปล่าหมุนเซ็นเซอร์ได้ เนื่องจากขณะนี้เซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวยังไม่ได้ล็อกเข้ากับสายโซ่ แสดงดังรูปที่ 3.20)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.20 การหมุนปรับตั้งค่าเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

3. ปรับล็อกเฟืองโซ่ให้เข้าไปขับที่สายโซ่ให้พอดีไม่แน่นหรือหลวมจนเกินไปและต้องไปเกิดการไถล (ขณะนี้ไม่สามารถปรับหมุนเซ็นเซอร์ด้วยมือได้ และในขณะเดียวกันเมื่อหมุนพวงมาลัยเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวก็จะหมุนไปด้วย)

4. หมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย แล้ววัดมุมเลี้ยวที่ล้อคู่หน้า กำหนดให้ได้มุมเลี้ยวเท่ากับ -40 องศา แล้วบันทึกค่าจากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

5. หมุนพวงมาลัยเลี้ยวขวา แล้ววัดมุมเลี้ยวที่ล้อคู่หน้า กำหนดให้ได้มุมเลี้ยวเท่ากับ 40 องศา แล้วบันทึกค่าจากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว

เนื่องจากขีดจำกัดทางกลของรถกอล์ฟไฟฟ้าคันนี้สามารถเลี้ยวซ้ายสุดที่มุมเลี้ยวเท่ากับ -46 องศา และสามารถเลี้ยวขวาสุดที่มุมเลี้ยวเท่ากับ 50 องศา ในการออกแบบและสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว จึงต้องเลือกพิจารณาให้มุมเลี้ยวมากสุดของระบบอยู่ภายในกรอบของขีดความสามารถในการทำงานทางกลของรถกอล์ฟไฟฟ้าพร้อมทั้งพิจารณาถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยของระบบ (factor safety) เพื่อป้องกันการเสียหายต่อชิ้นส่วนทางกล จากข้างต้นจึงกำหนดให้มุมเลี้ยวซ้ายมากสุดของระบบเท่ากับ -40 และกำหนดให้มุมเลี้ยวขวามากสุดของระบบเท่ากับ 40 องศา จากนั้นเขียนโปรแกรมเทียบเคียงค่าระหว่างมุมเลี้ยวที่ล้อคู่หน้ามากสุดซ้ายถึงขวา (-40 ถึง 40) เทียบเคียงกับค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวที่บันทึกไว้จากข้อที่ 2, 4, 5 โดยใช้คำสั่ง (map)ในโปรแกรม (arduino)

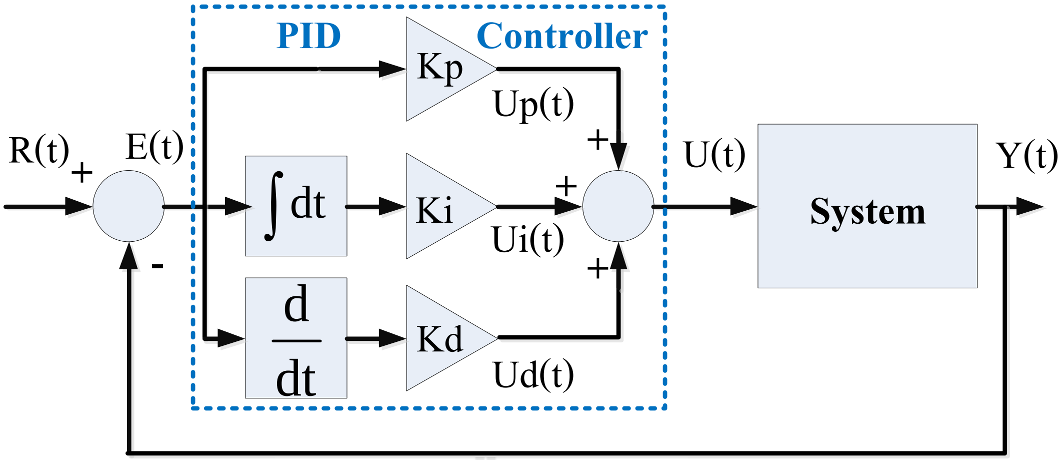
หลังจากกำหนดมุมเลี้ยวล้อคู่หน้ามากสุดแล้ว (-40 ถึง 40) ขั้นต่อมา คือ การดำเนินการเทียบเคียงค่าที่อุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยว อุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยวที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ชนิดที่มีลักษณะการทำงานแบบหมุนขนาด 1 กิโลโอห์ม (potentiometer 1 K) ซึ่งมีขีดความสามารถในการหมุนตั้งแต่ซ้ายสุดถึงขาวสุดประมาณ 0-270 องศา จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ แล้วเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ช่อง A/D ขนาด 10 บิต (0-1023) แล้วเขียนโปรแกรมโดยใช้คำสั่ง (map)ในโปรแกรม (arduino) เพื่อกำหนดการควบคุมบังคับเลี้ยวหมุนซ้ายสุดถึงขวาสุดให้อยู่ระหว่าง -40 ถึง 40 องศา เท่ากันกับมุมเลี้ยวที่ล้อคู่หน้าที่ได้กำหนดไว้ในขั้นต้นแล้ว

การดำเนินการขั้นต่อมา คือ การวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิด ซึ่งเหมือนกับการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตามการตรวจสอบสมมติฐาน แต่เพิ่มเติม คือ เชื่อมต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดเข้าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ช่อง A/D ขนาด 10 บิต (0-1023)

แล้วเขียนโปรแกรมโดยใช้คำสั่ง (map)ในโปรแกรม (arduino) แปลงค่าจาก 10 บิต (0-1023) ให้เป็น 12 บิต (0-4095) แสดงผลเป็นค่าตัวเลขดิจิทัลขนาด 12 บิต (0-4095) ผ่านมอดูลจอแสดงผลแอลซีดี แล้วหมุนพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย และเลี้ยวขวา บันทึกค่าดังกล่าว ดังนี้ ขณะไม่มีการหมุนพวงมาลัย วัดค่าได้ประมาณ 2047-2048 และในขณะเลี้ยวซ้าย วัดค่าได้ประมาณเริ่มตั้งแต่ 1880 แล้วลดลงตามความแรงของการหมุนพวงมาลัย และในขณะเลี้ยวขวา วัดค่าได้ประมาณเริ่มตั้งแต่ 2210 แล้วเพิ่มขึ้นตามความแรงของการหมุนพวงมาลัย

เนื่องจากค่าสัญญาณจากอุปกรณ์รับรู้แรงบิดแปรผันตามความแรงในการหมุนพวงมาลัย ซึ่งหากเป็นการส่งค่าสัญญาณเสมือนที่ส่งผลให้เกิดการเลี้ยวที่รุนแรงเกินไปอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย และป้องกันความเสียหายต่อชิ้นส่วนของระบบการทำงาน จึงกำหนดค่าขีดสุดของสัญญาณเสมือนที่ใช้ในการทำงานของระบบให้มีค่าอยู่ภายในช่วงดังต่อไปนี้ การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายเริ่มต้นจากประมาณ 1880 ลงไปจนถึงประมาณ 1480 (อยู่ในช่วงแรงดันจากประมาณ 2.3 ลงไปจนถึงประมาณ 1.8 โวลต์) และการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาเริ่มต้นจากประมาณ 2200 ขึ้นไปจนถึงประมาณ 2600 (อยู่ในช่วงแรงดันจากประมาณ 2.7 ขึ้นไปจนถึงประมาณ 3.2 โวลต์)

จากนั้นดำเนินการเขียนโปรแกรม (arduino) สร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว และนำตัวควบคุมแบบพีไอดีเข้าไปใช้ในระบบควบคุมดังกล่าว ซึ่งระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการควบคุม แสดงแผนผังระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีตามรูปภาพที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

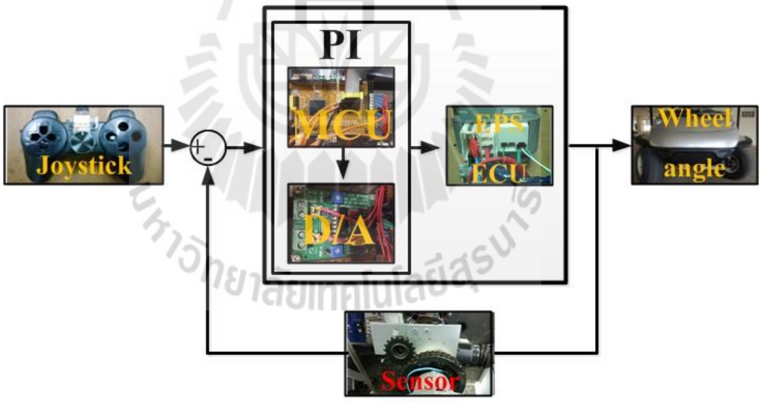
กระบวนการทำงานของระบบควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว สามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากผู้ควบคุมกำหนดมุมเลี้ยวเป้าหมายอ้างอิง (setpoint : R(t)) โดยการหมุนเลือกมุมเลี้ยวจากอุปกรณ์ควบคุมบังคับเลี้ยว จากนั้นค่ามุมเลี้ยวเป้าหมายอ้างอิงจะถูกส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) พร้อมกับอ่านค่ามุมเลี้ยวจากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยวด้วย และสัญญาณดังกล่าวทั้งคู่จะถูกแปลงจากแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) ขนาด 10 บิต จากนั้นสัญญาณดิจิทัลทั้งคู่นี้จะถูกส่งเข้าไปประมวลผลที่อัลกอริทึม (โปรแกรมการควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี) แล้วส่งค่าการควบคุมออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ไปที่มอดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A) ขนาด 12 บิต จากนั้นสัญญาณควบคุมแอนะล็อกเสมือนดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า แล้วสั่งงานมอเตอร์ไฟฟ้าให้ทำงานจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวที่ล้อของรถกอล์ฟไฟฟ้า

สำหรับระบบที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถทำการสุ่มค่าเกน K_p K_i และ K_d ได้ เรียกว่าการปรับจูนด้วยมือ (handle tuning) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการปรับจูนด้วยมือ และจากการปรับจูนค่าพารามิเตอร์พีไอดี (ค่า K_p, K_i, และ K_d) สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าที่เหมาะสมกับระบบ คือ K_p เท่ากับ 25 K_i เท่ากับ 250 และ K_d เท่ากับ 0 แสดงดังตารางที่ 3.3 หลังจากการปรับจูนแล้วเสร็จ อธิบายได้ดังนี้ ระบบนี้ควรใช้ตัวควบคุมเพียง 2 ตัว กล่าวคือ ควรเป็นการควบคุมแบบพีไอ (PI controller)

เนื่องจากสำหรับระบบนี้เทอมของอนุพันธ์ส่งผลเสี่ยงต่อการขาดเสถียรภาพของระบบค่อนข้างสูง ถึงแม้เทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดการกระเพื่อม (over shoot) ที่เกิดจากปริพันธ์ แต่เทอมของปริพันธ์จะมีผลตอบสนองที่ไวมากต่อสัญญาณรบกวนที่ถูกขยาย ซึ่งหากอัตราขยายมีขนาดใหญ่เพียงพอ สามารถทำให้กระบวนการขาดเสถียรภาพได้ แม้ว่าค่าที่เลือกนำมาใช้ในการปรับจูนจะมีค่าที่น้อยมากๆ จากการทดสอบระบบควบคุมในสภาพแวดล้อมบนถนนจริงแล้ว ทำให้แน่ใจได้ว่าระบบนี้ต้องใช้การควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากระบบสามารถเข้าสู่เป้าหมายได้ทันต่อการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า แผนผังการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.22

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์พีไอดี (gain)

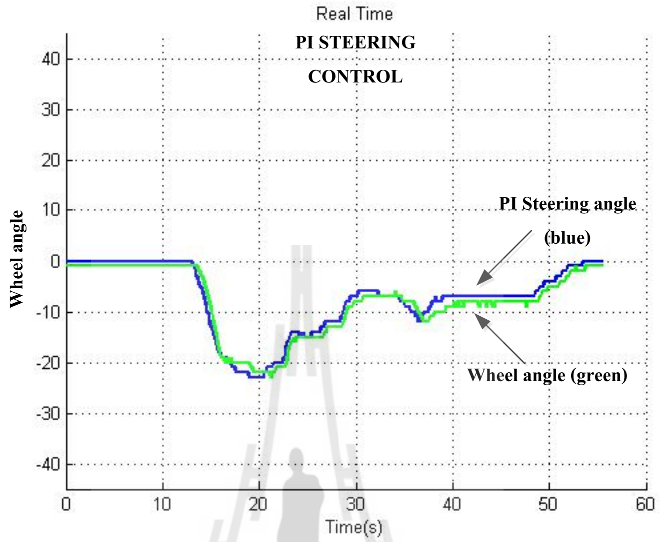
ค่าพารามิเตอร์พีไอดี (gain)		
Kp	Ki	Kd
25	250	0



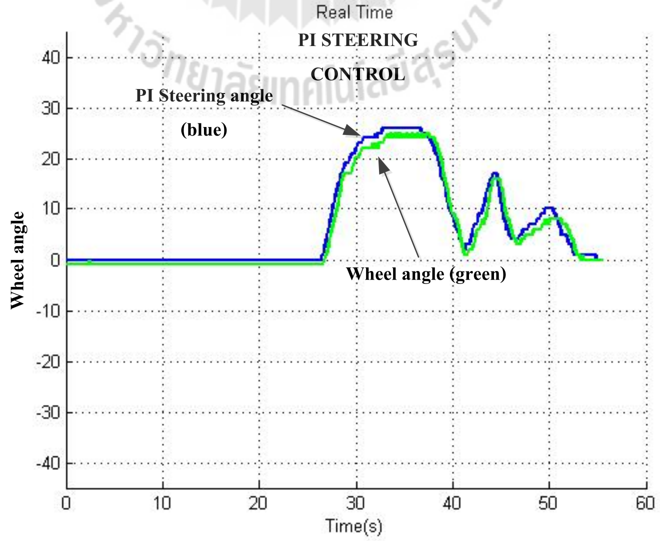
รูปที่ 3.22 แผนภาพระบบควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

3.4.3 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

การควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว ที่สภาพแวดล้อมบนถนนจริงภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

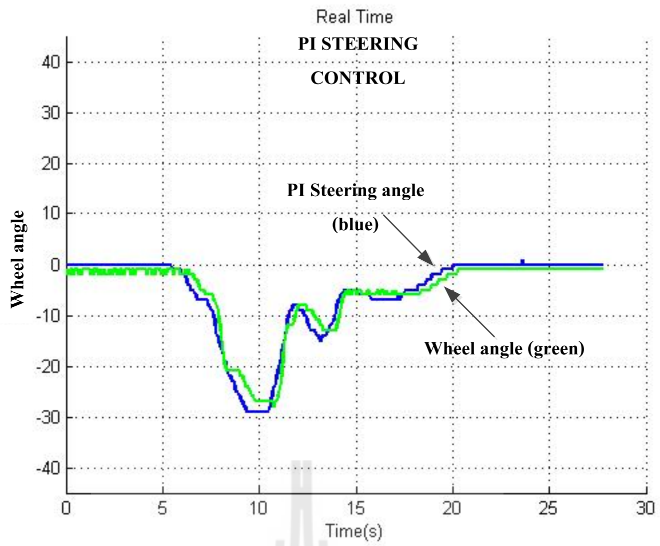


รูปที่ 3.23 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว)

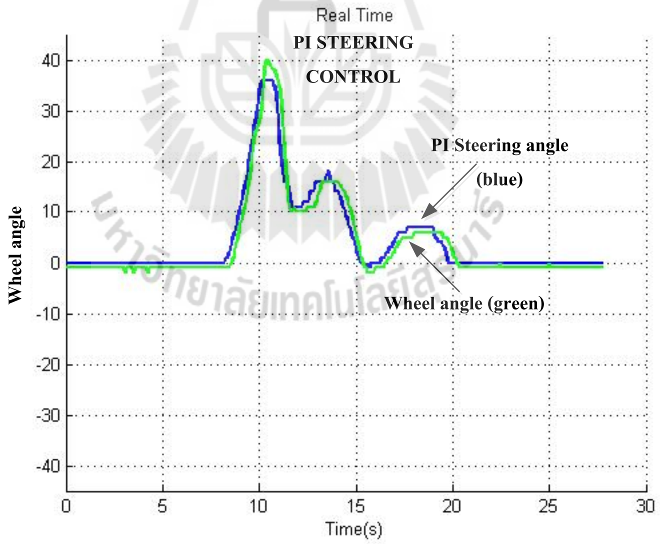


รูปที่ 3.24 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.25 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว)



รูปที่ 3.26 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว)

จากผลการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยวผ่านระบบควบคุมแบบพีไอ พบว่า ระบบสามารถติดตามเข้าสู่เป้าหมายอ้างอิงได้เป็นอย่างดี ผลของระบบควบคุมแบบพีไอเป็นที่พอใจ แต่จากกราฟรูปที่ 3.23 ถึง 3.26 เห็นได้ชัดเจนว่า การควบคุมบังคับเลี้ยวค่อนข้างส่ายไปมา เนื่องจาก ความเคยชินที่ได้รับจากการขับรถด้วยพวงมาลัยมาโดยตลอด ทำให้รู้สึกไม่ชินกับการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยวและส่งผลโดยตรงในการกำหนดทิศทางการเลี้ยว ซึ่งยังไม่มีความเหมาะสมเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับการใช้พวงมาลัยจริง ดังนั้น เพื่อสร้างการควบคุมบังคับเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยวให้เสมือนการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์โดยใช้พวงมาลัยจริง ในงานวิจัยนี้จึงสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมขึ้นมา ดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 ต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5 สรุป

ในเนื้อหาวิทยานิพนธ์บทที่ 3 นี้ อธิบายถึงการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในส่วนงานด้านฮาร์ดแวร์ และการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า ตั้งแต่การเลือกใช้ชุดบังคับเลี้ยว ซึ่งมีส่วนสำคัญต่องานวิจัยอย่างมาก ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายด้าน ได้แก่ ต้องมีความปลอดภัยสูง ประสิทธิภาพในการทำงานต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การควบคุมต้องสามารถสร้างระบบควบคุมเข้าไปได้ ลักษณะทางกายภาพ ขนาดและรูปร่างต้องมีความเหมาะสมกับพื้นที่สำหรับติดตั้ง กลไกการทำงานต้องสามารถปรับแต่งเข้ากับรถกอล์ฟไฟฟ้าได้โดยง่าย ค่าใช้จ่ายต้องไม่สูงจนเกินไป และชุดบังคับเลี้ยวที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากที่สุด คือ ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering : C-EPS)

ขั้นตอนในการปรับแต่งและติดตั้งชุดบังคับเลี้ยวอย่างละเอียด ซึ่งมีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน ต้องดำเนินการให้ถูกต้องตามระบบการทำงานทางกลของชุดบังคับเลี้ยว และอยู่ภายใต้ขีดจำกัดความสามารถทางกล เพราะส่วนงานทางกลไกการบังคับเลี้ยวเป็นส่วนดำเนินการตรง ต้องมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ ถ้าหากว่าคำสั่งการควบคุมถูกส่งออกจากซอฟต์แวร์มาที่ชุดฮาร์ดแวร์ แล้วเกิดความคลาดเคลื่อนที่ชุดฮาร์ดแวร์ในระดับเกินจุดรับได้ ก็อาจจะไม่สามารถดำเนินงานได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ สิ่งนี้เองที่งานวิจัยด้านฮาร์ดแวร์ต้องคำนึงถึงอย่างมาก ซึ่งหากเป็นงานวิจัยด้านซอฟต์แวร์ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถนำสิ่งนี้ เข้าไปจำลองผลการทำงานได้อย่างไร้ข้อกังวล และช่วยในการพัฒนาองค์ความรู้ต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

การควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว คือ การควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบไม่ใช้พวงมาลัย ดำเนินการ โดยออกแบบ และสร้างอุปกรณ์บังคับเลี้ยวขึ้นมา เพื่อใช้ควบคุมทิศทางการเลี้ยวของรถกอล์ฟไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมบนถนนจริง พร้อมทั้งสร้างเสถียรภาพให้กับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว โดยการนำตัวควบคุมแบบพีไอ เข้าไปใช้ในระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า

บทที่ 4
การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และวิชวลเซอร์โว

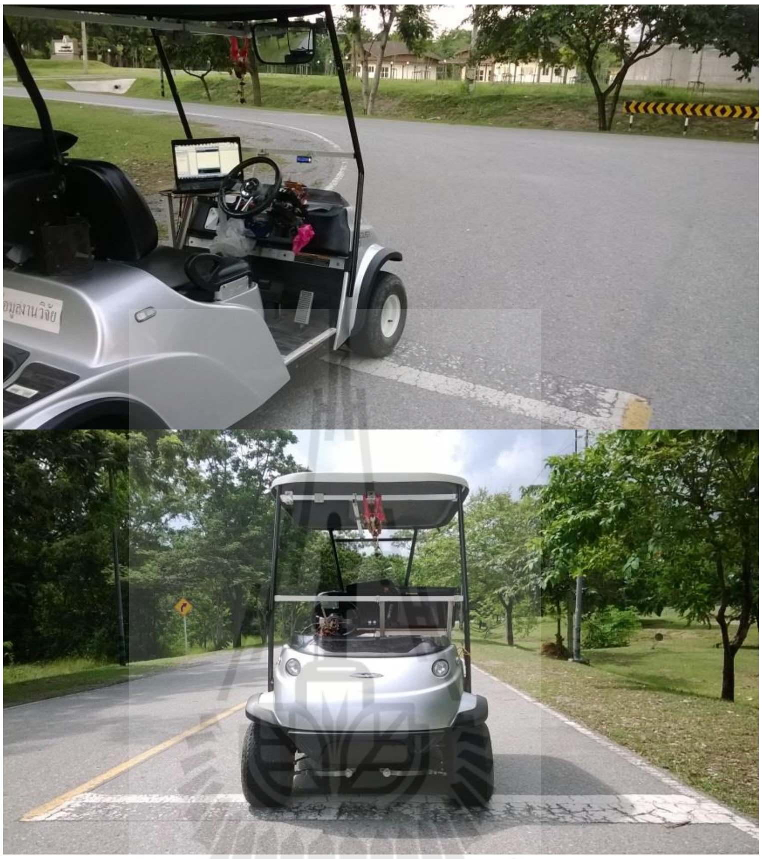
4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 จะเป็นการอธิบายถึงการนำเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยเนื้อหาที่นำเสนอประกอบด้วย การเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว ซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มต้น ข้อมูลดังกล่าวได้จากการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าไปบนถนนจริง หัวข้อต่อมาคือการคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เป็นการระบุเอกลักษณะของรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ได้จากการเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวจากหัวข้อก่อนหน้านั้น จากนั้นหากเมื่อต้องการฝึกสอนระบบด้วยข้อมูลใหม่ ระบบจะทำการคัดแยกกลุ่มของรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เพื่อตรวจสอบรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวในครั้งใหม่นี้ซ้ำซ้อนกับรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวแบบที่มีอยู่แล้วหรือไม่ ในหัวข้อนี้ใช้ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (adaptive resonance theory : ART) เป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแข่งขันประเภทหนึ่ง และอีกหัวข้อหนึ่งคือการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม ทั้งแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว และแบบอัตโนมัติ ซึ่งทั้งสองแบบใช้โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายไปข้างหน้า (feed forward) แบบหลายชั้นที่มีการฝึกสอนโดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (back-propagation)

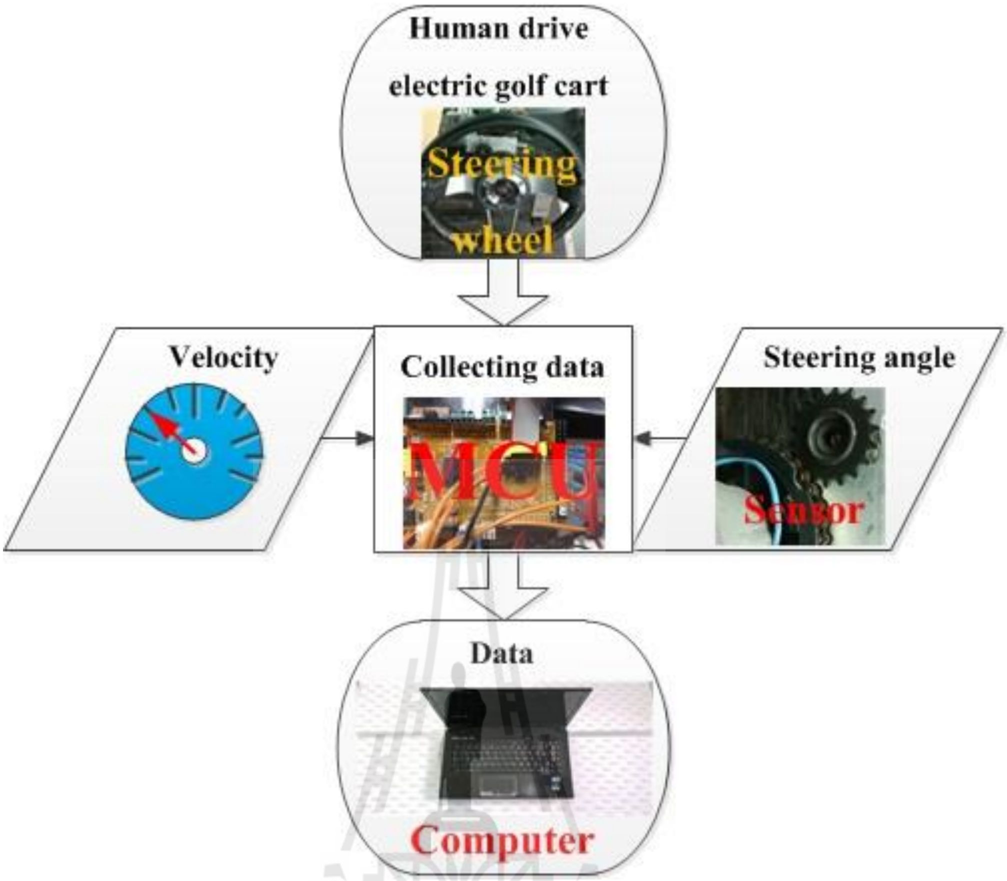
4.2 การเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว

การเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวสำหรับงานวิจัยนี้ คือ การบันทึกค่ามุมเลี้ยวของล้อคู่หน้าที่สัมพันธ์กับเวลา นับตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการเลี้ยว ซึ่งมีความสำคัญมาก เนื่องจากในงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม ต้องอาศัยลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์เป็นต้นแบบในการฝึกสอนระบบ ข้อมูลการฝึกสอนดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อระบบ กล่าวคือ หากข้อมูลการฝึกสอนระบบมีลักษณะพฤติกรรมเป็นเช่นใด ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวก็จะมีลักษณะเหมือนหรือใกล้เคียงกับลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวเช่นนั้น โดยเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ (arduino)

อ่านค่ามุมเลี้ยวจากเซ็นเซอร์วัดมุมเลี้ยว แล้วนำไปจัดเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์ในรูปแบบของไฟล์ Excel กระบวนการดำเนินงานเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวแสดงแผนผังดัง รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 สภาวะเริ่มต้นก่อนการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว



รูปที่ 4.2 แผนผังการเก็บข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว

4.3 การคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว

ในงานวิจัยนี้ การคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวรถไฟฟ้า เป็นกระบวนการสำหรับระบุ และคัดแยกข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวรถไฟฟ้าที่จะใช้เป็นต้นแบบในการฝึกสอน โดยแบ่งเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการฝึกสอนเครือข่าย และกระบวนการใช้งานเครือข่าย

4.3.1 แนวคิดและสมมติฐานเบื้องต้น

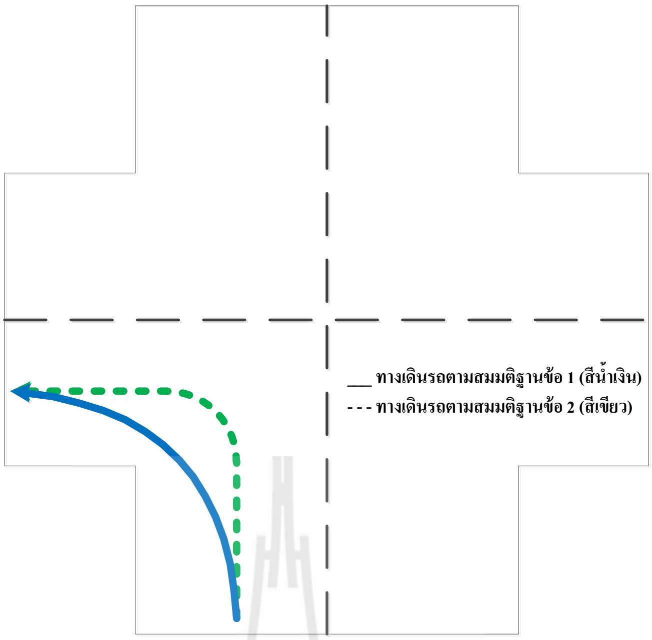
เนื่องจากพฤติกรรมในการควบคุมบังคับเลี้ยวของมนุษย์แต่ละคนนั้น มีลักษณะที่แตกต่างกัน ตามความถนัด ความเคยชินของแต่ละคน ดังนั้น จึงต้องทำการระบุลักษณะพฤติกรรมและคัดแยกกลุ่มของลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวออกเป็นกลุ่ม เครื่องมือที่นำมาใช้ในการระบุและคัดแยกกลุ่มของลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว ได้แก่ ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (adaptive resonance theory : ART) ART เป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแข่งขันประเภทหนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูล และคุณสมบัติเด่นอีกอย่าง

ของ ART คือ สภาพพลาสติกหรือความสามารถในการตอบสนองข้อมูลใหม่ เมื่อส่งข้อมูลกลุ่มใหม่ที่เครือข่ายยังไม่ได้ เรียนรู้ จดจำ และยังไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มใด เข้าไปในเครือข่าย ART เครือข่าย ART สามารถที่จะเรียนรู้กลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่ และสามารถระบุกลุ่มข้อมูลนั้นเพิ่มเติมใหม่ขึ้นมาได้ทันที โดยกำหนดความเร็วรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องคงที่ตลอดการควบคุมบังคับเลี้ยว นับตั้งแต่เริ่มออกตัวที่ความเร็วเป็น 0 km/h จนขึ้นไปถึงความเร็วที่กำหนดไว้ (รถกอล์ฟไฟฟ้ามีขีดจำกัดความเร็ว คือ สามารถเลือกความเร็วได้เฉพาะ 3,7,10,13,19,20,22,25,29 km/h เท่านั้น) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะ ความเร็ว 3 km/h และ 7 km/h เท่านั้น และมีสมมติฐานเบื้องต้นขณะควบคุมบังคับเลี้ยว ดังนี้

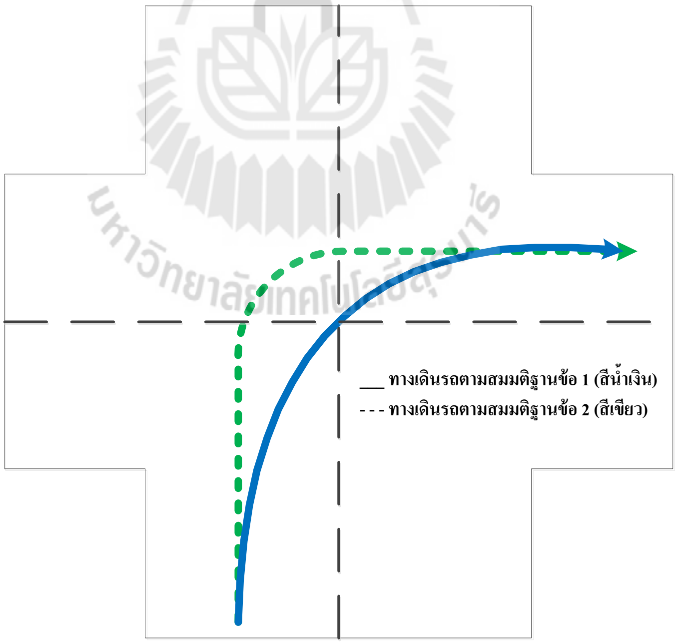
1. หากเริ่มทำการหักเลี้ยวพวงมาลัยเร็วกว่า มุมเลี้ยวของล้อคู่หน้าที่มากที่สุดในชุดข้อมูลการเลี้ยวนั้น ก็จะมีค่าน้อย แสดงดังรูปที่ 4.3

2. หากเริ่มทำการหักเลี้ยวพวงมาลัยช้ากว่า มุมเลี้ยวของล้อคู่หน้าที่มากที่สุดในชุดข้อมูลการเลี้ยวนั้น ก็จะมีค่ามาก แสดงดังรูปที่ 4.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก. ทางเดินรถเลี้ยวซ้ายตามสมมติฐาน



ข. ทางเดินรถเลี้ยวขวาตามสมมติฐาน

รูปที่ 4.3 ทางเดินรถตามสมมติฐาน

4.3.2 กระบวนการฝึกสอนเครือข่ายทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว

การฝึกสอนเครือข่ายทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัวประกอบด้วยขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. การกำหนดรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยว ดังนี้

เลี้ยวซ้ายสุด กำหนดมุมเลี้ยว เท่ากับ -40 องศา (รถไฟฟ้ามีขีดจำกัดการเลี้ยวซ้ายสุด วัดได้ -46 องศา)

เลี้ยวขวาสุด กำหนดมุมเลี้ยว เท่ากับ 40 องศา (รถไฟฟ้ามีขีดจำกัดการเลี้ยวขวาสุด วัดได้ 50 องศา)

ตั้งล้อหน้าตรง กำหนดมุมเลี้ยว เท่ากับ 0 องศา

กำหนดช่วงมุมเลี้ยวของแต่ละทิศทางการควบคุมบังคับเลี้ยว เนื่องจากต้องการเฉพาะข้อมูลการฝึกสอนที่เกิดจากการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ราบเรียบ ไม่ต้องการให้ทิศทางของตัวรถไฟฟ้าส่ายไปมาขณะเก็บข้อมูล และตัวรถกอล์ฟไฟฟ้าต้องไม่ตกถนน พร้อมทั้งอยู่ในช่องทางการขับที่ถูกต้อง (ช่องทางด้านซ้าย) ตลอดเวลา จึงกำหนดดังนี้

การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย มุมเลี้ยวจะต้องอยู่ในช่วง -40 ถึง 0 องศา เท่านั้น

การควบคุมบังคับเลี้ยวขวา มุมเลี้ยวจะต้องอยู่ในช่วง 0 ถึง 40 องศา เท่านั้น

เลือกแยกถนน และทิศทาง ที่จะทำการควบคุมบังคับเลี้ยว

กำหนดจุดจอดรถให้เป็นจุดเดิมจุดเดียวกัน เพื่อเป็นจุดเริ่มต้น โดยให้ล้อหน้าทั้งสองล้อตั้งตรง และเหยียบทับเส้นหยุดสีขาว แสดงจุดจอดเริ่มต้นดังรูปที่ 4.1

กำหนดความเร็วที่ใช้ในการขับ ความเร็วจะต้องคงที่ตลอดการเลี้ยว นับตั้งแต่เริ่มออกตัวที่ความเร็วเป็น 0 Km/h จนขึ้นไปถึงความเร็วที่กำหนดไว้

2. การเก็บข้อมูลมุมเลี้ยวที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่าย

ทำการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าบังคับเลี้ยวไปในทิศทางที่เลือก ตามความเร็วที่เลือกไว้ แล้วพิจารณาว่าเวลาที่เริ่มหักเลี้ยววงพวงมาลัยที่สามารถทำได้นั้น เร็วสุดที่วินาทีที่เท่าไร และช้าสุดที่วินาทีที่เท่าไร

พิจารณาเลือก จำนวนชุดข้อมูลที่ต้องการ โดยให้เวลาที่เริ่มหักเลี้ยวอยู่ในช่วง เร็วสุด ถึงช้าสุด

ทำการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลมุมเลี้ยวตามจำนวนรอบที่เลือกไว้

ตัวอย่างการเก็บข้อมูลมุมเลี้ยวที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่าย แยกถนนที่ทำการทดลอง ได้แก่ 3 แยกรูปตัวที ข้างสวนจราจรโตโยต้า แสดงดังรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 ตำแหน่งแยกถนนที่ทำการทดลอง

ตัวอย่างการเลี้ยวซ้าย โดยใช้ความเร็วรถไฟฟ้า 3 Km/h

กำหนดจุดจอดเริ่มต้น โดยให้ล้อหน้าทั้งสองตั้งตรง และเหยียบทับเส้นหยุด สีขาว

เลือกความเร็วรถไฟฟ้า เท่ากับ 3 Km/h

ทดลองขับรถไฟฟ้าจากจุดจอด เลี้ยวไปทางซ้าย จนสิ้นสุดการเลี้ยว ตามรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวที่กำหนดไว้ จากนั้นพิจารณาแล้ว พบว่า เวลาที่เริ่มหักเลี้ยวพวงมาลัยที่สามารถทำได้ เร็วสุด คือ วินาทีที่ 5 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป และช้าสุด คือ วินาทีที่ 20 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป เลือกแบ่งรอบการเก็บข้อมูลการเลี้ยวออกเป็น 4 รอบ 4 ชุดข้อมูล ดังนี้

1.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

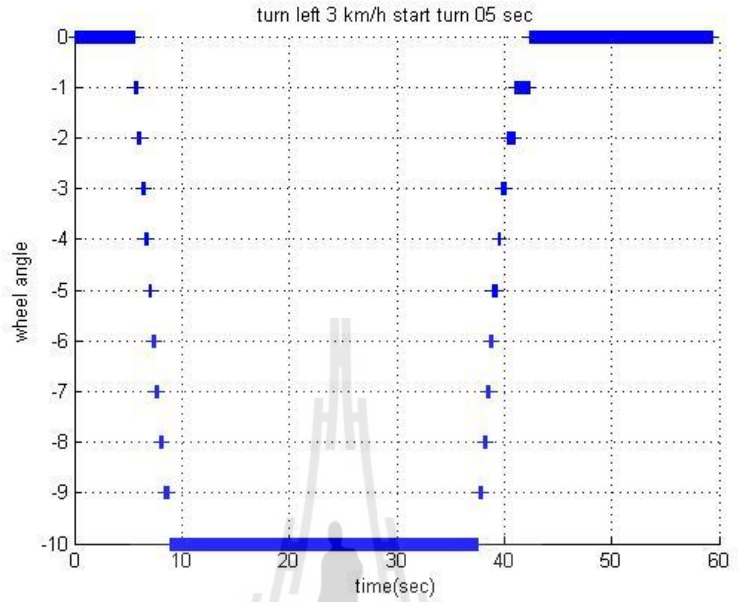
2.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 10

3.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 15

4.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 20

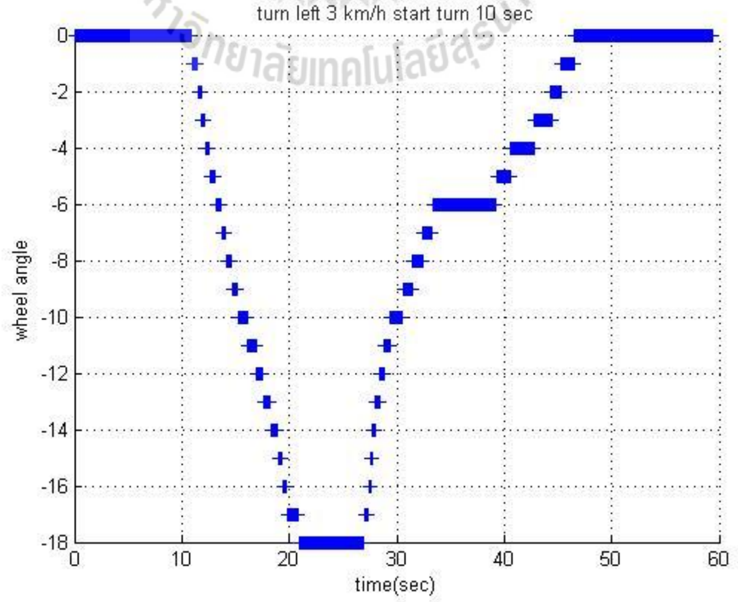
เริ่มขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการเลี้ยวทีละรอบ ทั้งหมด 4 รอบ ดังนี้

รอบที่ 1 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 5 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.5



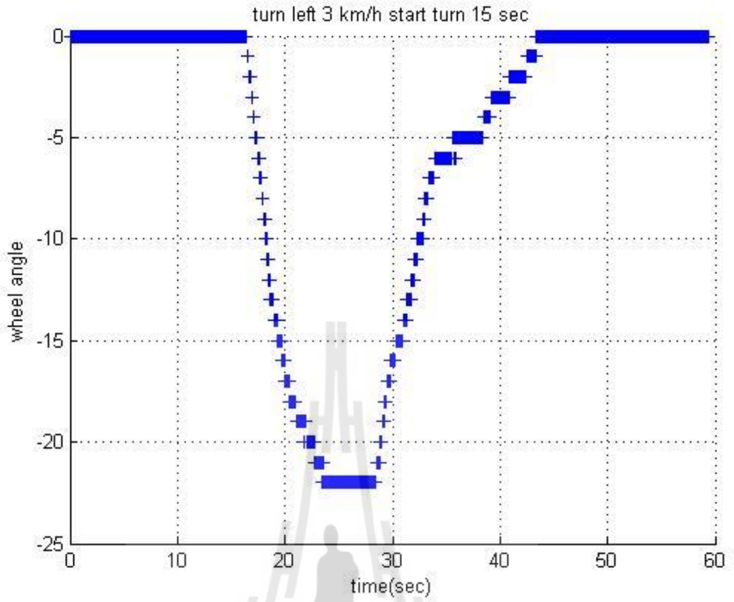
รูปที่ 4.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5

รอบที่ 2 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 10 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.6



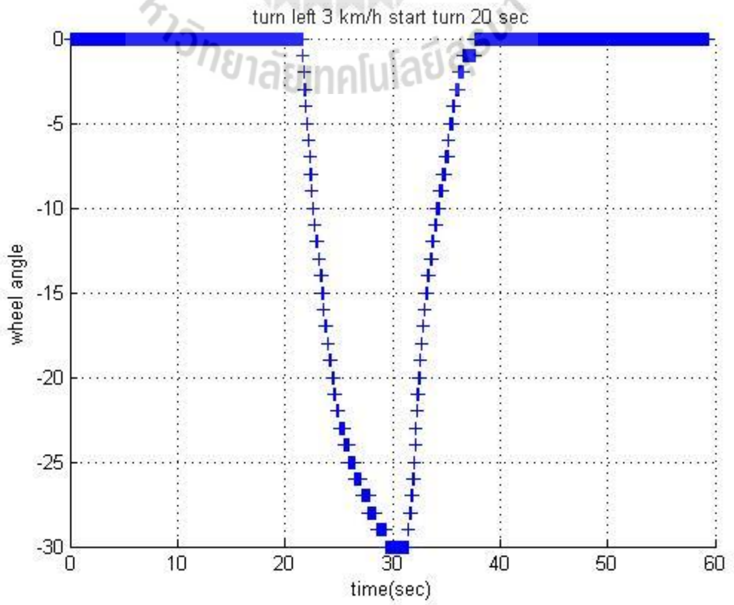
รูปที่ 4.6 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10

รอบที่ 3 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 15 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.7



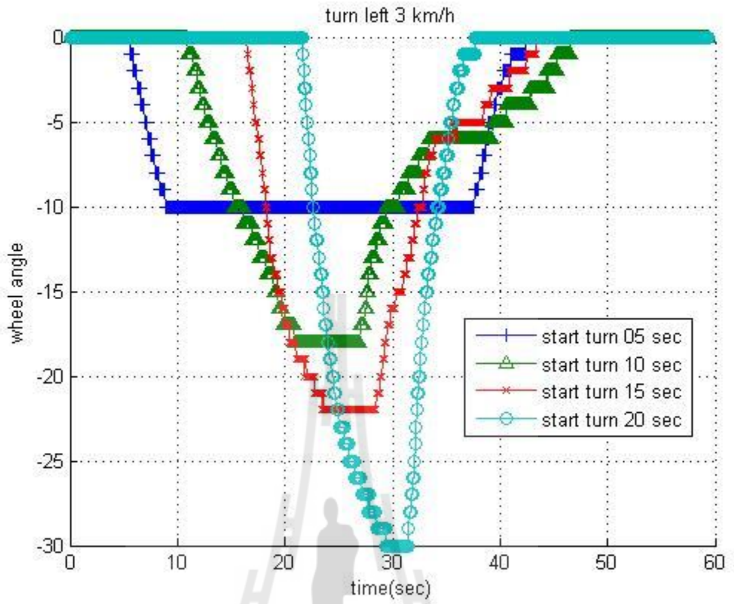
รูปที่ 4.7 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 15

รอบที่ 4 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 20 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 20

แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/hรวมทั้ง 4 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5, 10, 15, และ 20 ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 3 Km/h รวมทั้ง 4 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5, 10, 15, และ 20

ตัวอย่างการเลี้ยวขวา โดยใช้ความเร็วรถไฟฟ้า 3 Km/h

กำหนดจุดจอดเริ่มต้น โดยให้ล้อหน้าทั้งสองตั้งตรง และเหยียบทับเส้นหยุดสีขาว

เลือกความเร็วรถไฟฟ้า เท่ากับ 3 Km/h

ทดลองขับรถไฟฟ้าจากจุดจอด เลี้ยวไปทางขวา จนสิ้นสุดการเลี้ยว ตามรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวที่กำหนดไว้ จากนั้นพิจารณาแล้ว พบว่า เวลาที่เริ่มหักเลี้ยวพวงมาลัยที่สามารถทำได้ เร็วสุด คือ วินาทีที่ 10 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป และช้าสุด คือ วินาทีที่ 30 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป เลือกแบ่งรอบการเก็บข้อมูลการเลี้ยวออกเป็น 5 รอบ 5 ชุดข้อมูล ดังนี้

1.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 10

2.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 15

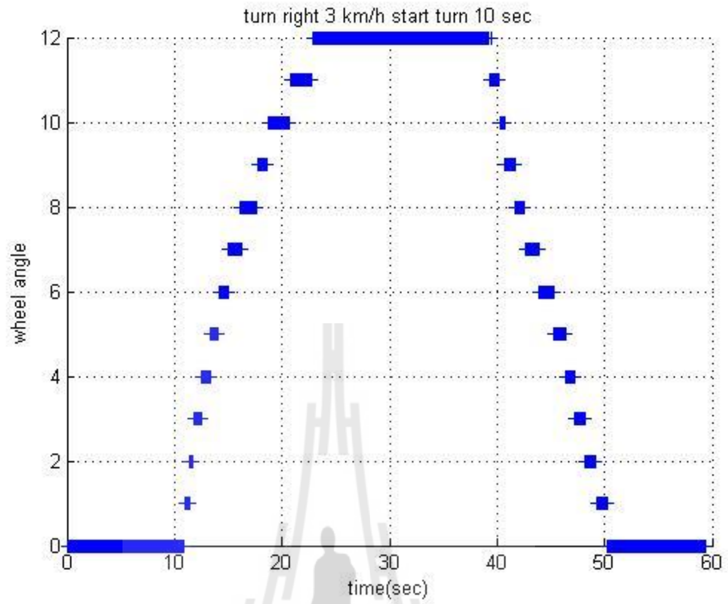
3.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 20

4.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 25

5.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 30

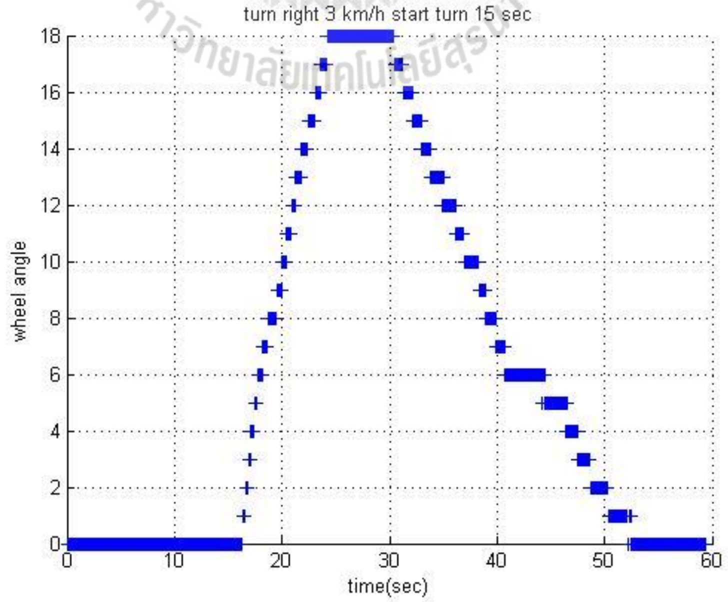
เริ่มขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการเลี้ยวทีละรอบ ทั้งหมด 5 รอบ ดังนี้

รอบที่ 1 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 10 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.10



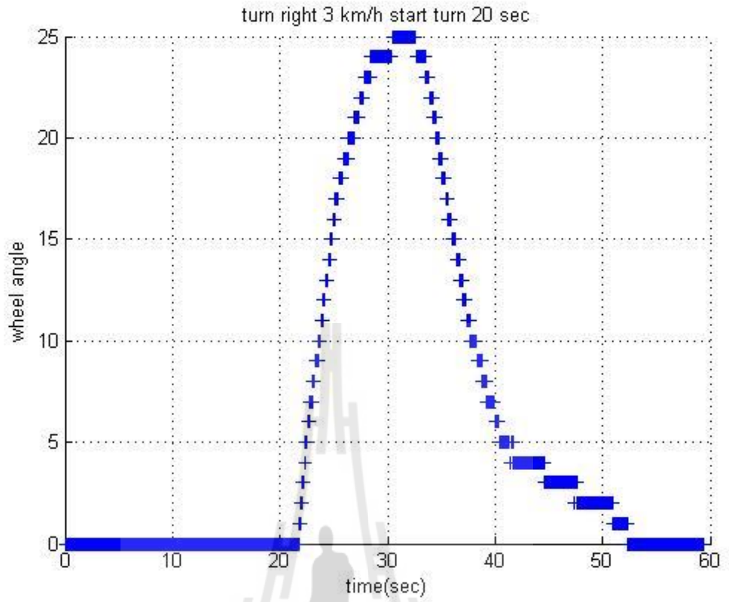
รูปที่ 4.10 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10

รอบที่ 2 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 15 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.11



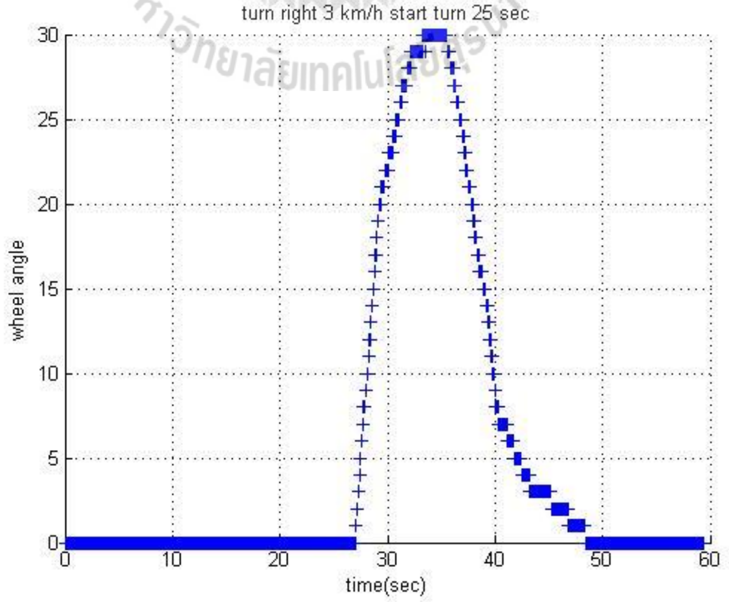
รูปที่ 4.11 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 15

รอบที่ 3 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 20 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.12



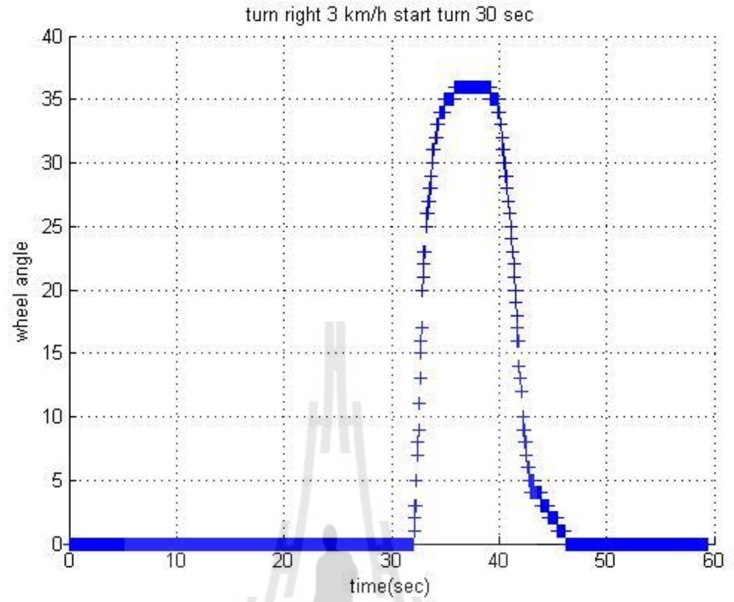
รูปที่ 4.12 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 20

รอบที่ 4 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 25 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.13



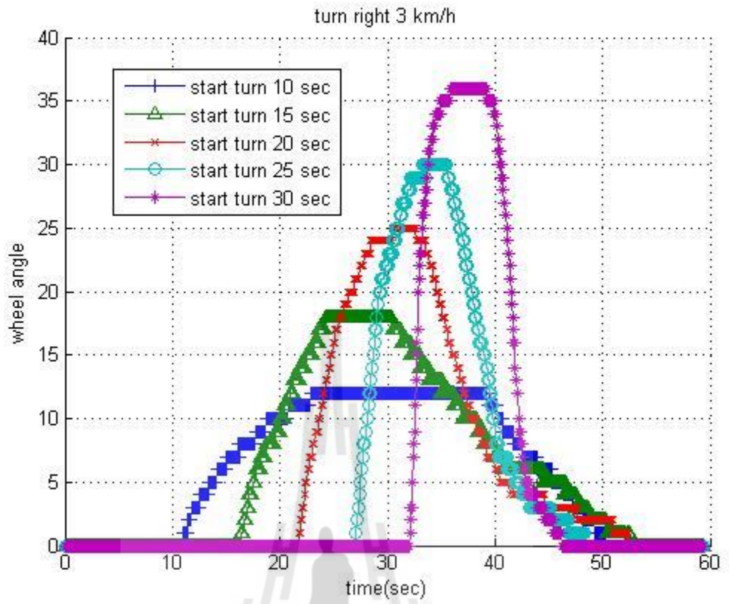
รูปที่ 4.13 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 25

รอบที่ 5 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 30 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 3 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 30

แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h รวมทั้ง 5 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h รวมทั้ง 5 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10, 15, 20, 25 และ 30

ตัวอย่างการเลี้ยวซ้าย โดยใช้ความเร็วรถไฟฟ้า 7 Km/h

กำหนดจุดจอดเริ่มต้น โดยให้ล้อหน้าทั้งสองตั้งตรง และเหยียบทับเส้นหยุดสีขาว

เลือกความเร็วรถไฟฟ้า เท่ากับ 7 Km/h

ทดลองขับรถไฟฟ้าจากจุดจอด เลี้ยวไปทางซ้าย จนสิ้นสุดการเลี้ยว ตามรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวที่กำหนดไว้ จากนั้นพิจารณาแล้ว พบว่า เวลาที่เริ่มหักเลี้ยวพวงมาลัยที่สามารถทำได้ เร็วสุด คือ วินาทีที่ 3 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป และช้าสุด คือ วินาทีที่ 7 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป เลือกแบ่งรอบการเก็บข้อมูลการเลี้ยวออกเป็น 3 รอบ 3 ชุดข้อมูล ดังนี้

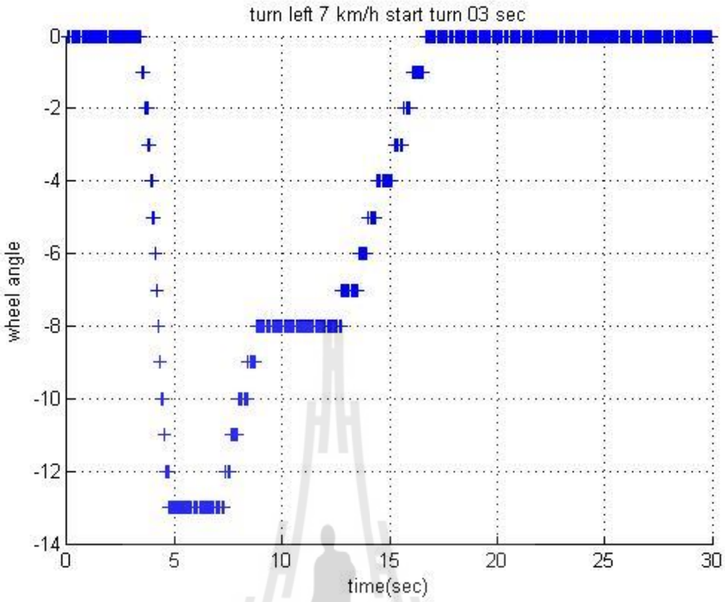
1.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 3

2.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

3.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 7

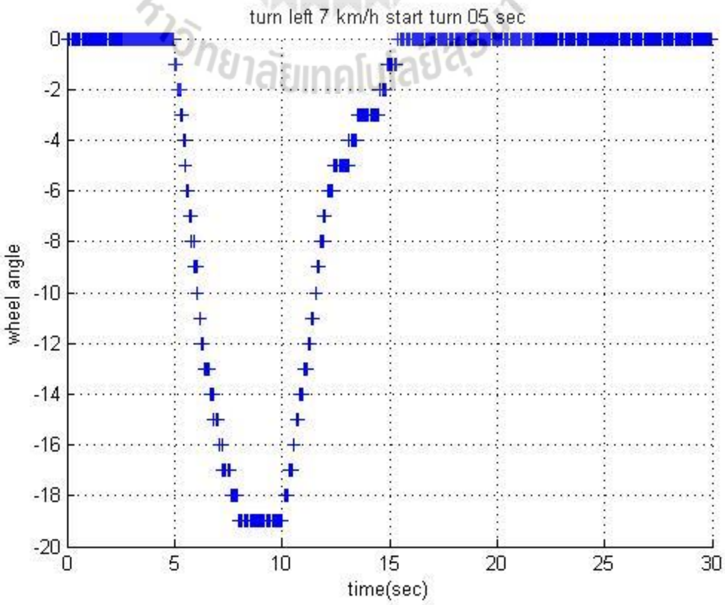
เริ่มขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการเลี้ยวทีละรอบ ทั้งหมด 3 รอบ ดังนี้

รอบที่ 1 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 3 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.16



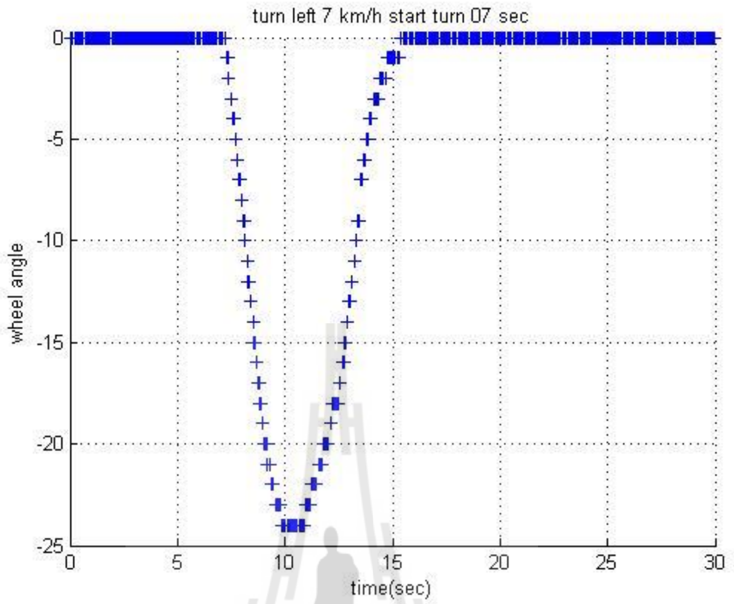
รูปที่ 4.16 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3

รอบที่ 2 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 5 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5

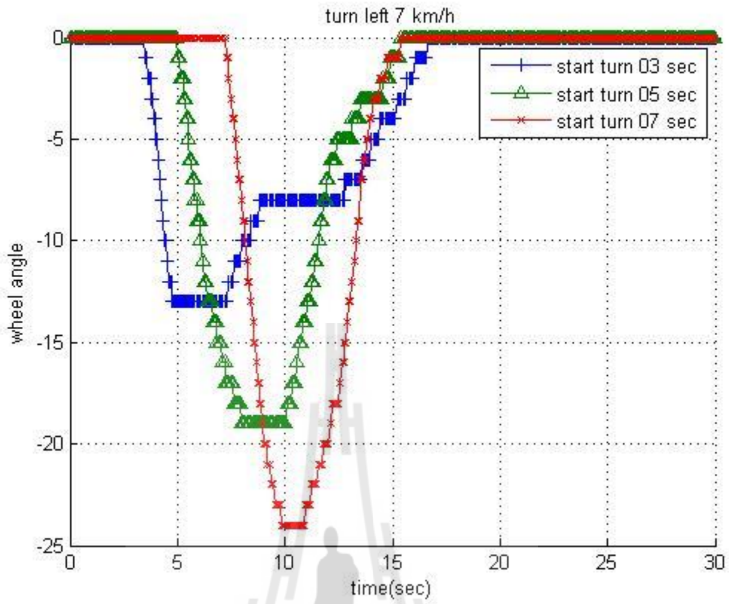
รอบที่ 3 เริ่มหักเลี้ยวซ้ายวินาทีที่ 7 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/hรวมทั้ง 3 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7 ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h รวมทั้ง 3 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7

ตัวอย่างการเลี้ยวขวา โดยใช้ความเร็วรถไฟฟ้า 7 Km/h

กำหนดจุดจอดเริ่มต้น โดยให้ล้อหน้าทั้งสองตั้งตรง และเหยียบทับเส้นหยุดสีขาว

เลือกความเร็วรถไฟฟ้า เท่ากับ 7 Km/h

ทดลองขับรถไฟฟ้าจากจุดจอด เลี้ยวไปทางขวา จนสิ้นสุดการเลี้ยว ตามรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวที่กำหนดไว้ จากนั้นพิจารณาแล้ว พบว่า เวลาที่เริ่มหักเลี้ยวพวงมาลัยที่สามารถทำได้ เร็วสุด คือ วินาทีที่ 3 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป และช้าสุด คือ วินาทีที่ 7 หลังจากรถเริ่มออกตัวไป เลือกแบ่งรอบการเก็บข้อมูลการเลี้ยวออกเป็น 3 รอบ 3 ชุดข้อมูล ดังนี้

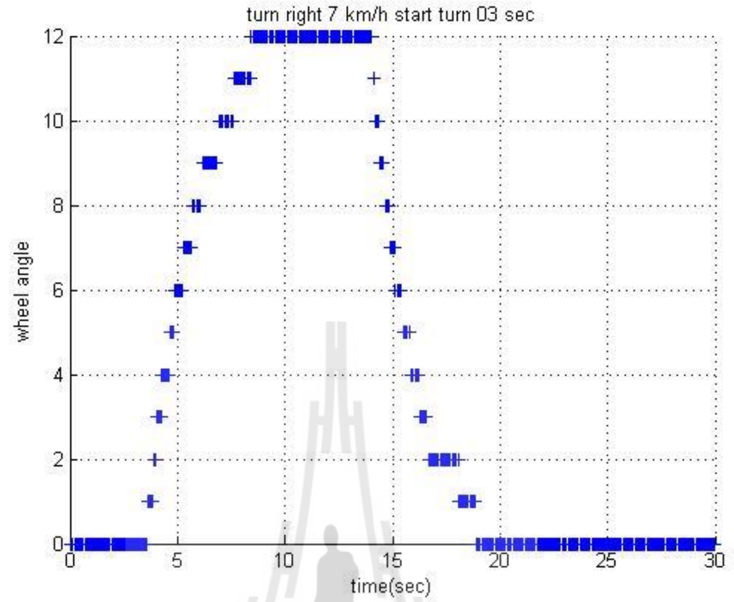
1.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 3

2.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

3.ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 7

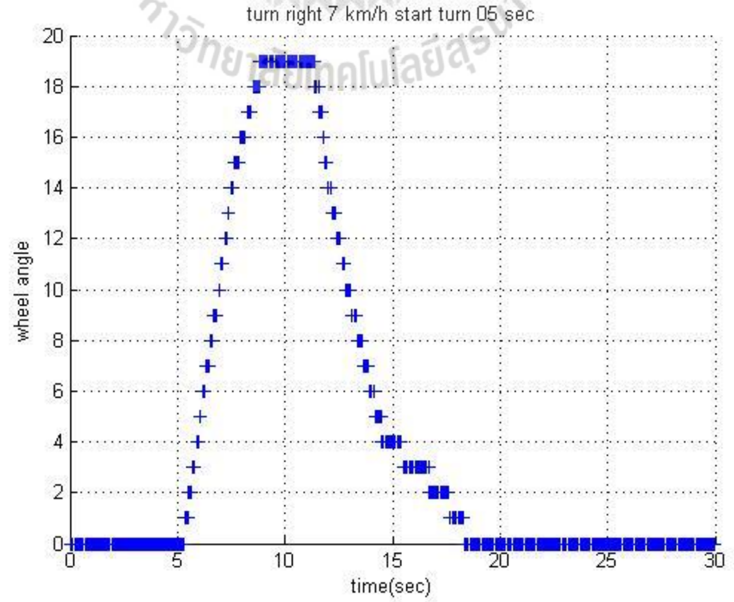
เริ่มขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลการเลี้ยวทีละรอบ ทั้งหมด 3 รอบ ดังนี้

รอบที่ 1 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 3 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.20



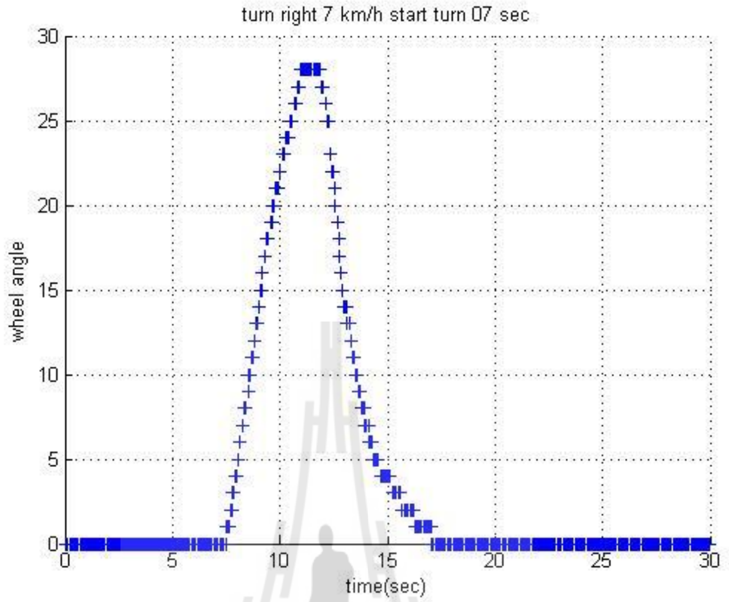
รูปที่ 4.20 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3

รอบที่ 2 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 5 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5

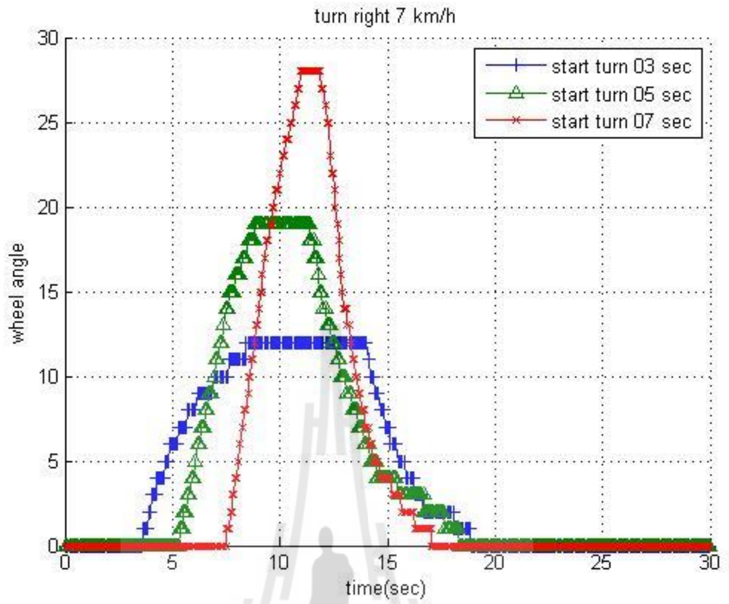
รอบที่ 3 เริ่มหักเลี้ยวขวาวินาทีที่ 7 แสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับเวลา ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ความเร็ว 7 Km/h เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h รวมทั้ง 3 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7 ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขวากับเวลา ที่ความเร็ว 7 Km/h รวมทั้ง 3 รอบ โดยเริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5, และ 7

3. การสร้างและฝึกสอนเครือข่าย ART

ในขั้นต้นสร้างอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรมแม็ทแล็ป เพื่อสกัดค่าเวลาที่เริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด ของแต่ละชุดข้อมูลการเลี้ยว (ตามสมมติฐานเบื้องต้น กล่าวคือ หากเริ่มทำการหักเลี้ยวเร็ว มุมเลี้ยวของล้อหน้าที่มากที่สุดในชุดข้อมูลการเลี้ยวนั้น ก็จะมีค่าน้อยกว่ามุมเลี้ยวของล้อหน้ามากสุดที่อยู่ในชุดข้อมูลการเลี้ยวที่เริ่มหักเลี้ยวช้ากว่า)

ใช้อัลกอริทึมสกัดให้ได้เฉพาะ ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมการเลี้ยวมากสุด ได้ผลดังนี้

ชุดข้อมูลการเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h ทั้ง 4 รอบ 4 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h

รอบการเลี้ยว	เวลาที่เริ่มหักเลี้ยว (วินาทีที่)	มุมเลี้ยวซ้ายมากสุด (องศา)
1	05	-10
2	10	-18
3	15	-22
4	20	-30

ชุดข้อมูลการเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ทั้ง 5 รอบ 5 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h

รอบการเลี้ยว	เวลาที่เริ่มหักเลี้ยว (วินาทีที่)	มุมเลี้ยวขวามากสุด (องศา)
1	10	12
2	15	18
3	20	25
4	25	30
5	30	36

ชุดข้อมูลการเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h ทั้ง 3 รอบ 3 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h

รอบการเลี้ยว	เวลาที่เริ่มหักเลี้ยว (วินาทีที่)	มุมเลี้ยวซ้ายมากสุด (องศา)
1	03	-13
2	05	-19
3	07	-24

ชุดข้อมูลการเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h ทั้ง 3 รอบ 3 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h

รอบการเลี้ยว	เวลาที่เริ่มหักเลี้ยว (วินาทีที่)	มุมเลี้ยวขวามากสุด (องศา)
1	03	12
2	05	19
3	07	28

สร้างอัลกอริทึม และฝึกสอนเครือข่าย ART ใช้โปรแกรมแม็ทแล็ป (Aaron Garrett 24 Dec 2003) โดยค่าอินพุทของเครือข่าย ART ได้แก่ ค่าเวลาที่เริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด

การเรียนรู้ของเครือข่าย ART หรือการปรับค่าน้ำหนักประสาท สามารถทำได้ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 1 ดังนี้

สมการการปรับค่าน้ำหนักประสาท

$$nw = (l_r * i_p) + ((1 - l_r) * w) \qquad (1)$$

โดยที่ nw คือ ค่าน้ำหนักประสาทใหม่

w คือ ค่าน้ำหนักประสาทเดิม

i_p คือ ค่าอินพุท

l_r คือ ค่าคงที่การเรียนรู้ มีค่า 0 ถึง 1

การฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าอินพุทที่ใช้ฝึกสอนเครือข่าย ART ได้แก่ เวลาเริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด

ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h ข้อมูลการเลี้ยวซ้ายของทั้ง 4 ชุดข้อมูล ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

ชุดข้อมูลที่ 2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 10

ชุดข้อมูลที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 15

ชุดข้อมูลที่ 4 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 ถึง ตารางที่ 4.14 และแสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	-	-	-
0.63	-	-	-
0.20	-	-	-
0.60	-	-	-

ตารางที่ 4.6 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	-	-	-
0.63	-	-	-
0.20	-	-	-
0.60	-	-	-

ตารางที่ 4.7 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	-	-	-
0.63	-	-	-
0.20	-	-	-
0.60	-	-	-

ตารางที่ 4.8 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.28	-	-
0.80	0.63	-	-
0.32	0.20	-	-
0.60	0.72	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.9 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.37	-
0.89	0.72	0.63	-
0.40	0.28	0.20	-
0.60	0.68	0.80	-

ตารางที่ 4.10 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.28	0.37
0.89	0.80	0.72	0.63
0.40	0.32	0.28	0.20
0.60	0.68	0.72	0.80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.11 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย
ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.28	0.37
0.89	0.80	0.72	0.63
0.40	0.32	0.28	0.20
0.60	0.68	0.72	0.80

ตารางที่ 4.12 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย
ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.28	0.37
0.89	0.80	0.72	0.63
0.40	0.32	0.28	0.20
0.60	0.68	0.72	0.80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.13 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.28	0.37
0.89	0.80	0.72	0.63
0.40	0.32	0.28	0.20
0.60	0.68	0.72	0.80

ตารางที่ 4.14 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00			
รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยวแบบที่ 4
0.11	0.20	0.28	0.37
0.89	0.80	0.72	0.63
0.40	0.32	0.28	0.20
0.60	0.68	0.72	0.80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.15 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 3 Km/h			
	ชุดข้อมูลที่ 1	ชุดข้อมูลที่ 2	ชุดข้อมูลที่ 3	ชุดข้อมูลที่ 4
0.10	1	1	1	1
0.50	1	1	1	1
0.75	1	1	1	1
0.90	1	1	2	2
0.92	1	2	2	3
0.94	1	2	3	4
0.96	1	2	3	4
0.98	1	2	3	4
0.99	1	2	3	4
1.00	1	2	3	4

ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ข้อมูลการเลี้ยวขวาของทั้ง 5 ชุดข้อมูล ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 10

ชุดข้อมูลที่ 2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 15

ชุดข้อมูลที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 20

ชุดข้อมูลที่ 4 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 25

ชุดข้อมูลที่ 5 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 30

ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.16 ถึง ตารางที่ 4.25 และแสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ ดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.16 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	-	-	-	-
0.49	-	-	-	-
0.12	-	-	-	-
0.64	-	-	-	-

ตารางที่ 4.17 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	-	-	-	-
0.49	-	-	-	-
0.12	-	-	-	-
0.64	-	-	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.18 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.51	-	-	-
0.56	0.49	-	-	-
0.12	0.36	-	-	-
0.70	0.64	-	-	-

ตารางที่ 4.19 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.35	0.51	-	-
0.73	0.56	0.49	-	-
0.12	0.25	0.36	-	-
0.82	0.70	0.64	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.20 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.35	0.51	-	-
0.73	0.56	0.49	-	-
0.12	0.25	0.36	-	-
0.82	0.70	0.64	-	-

ตารางที่ 4.21 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.27	0.35	0.44	0.51
0.81	0.73	0.65	0.56	0.49
0.12	0.18	0.25	0.30	0.36
0.88	0.82	0.75	0.70	0.64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.22 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.27	0.35	0.44	0.51
0.81	0.73	0.65	0.56	0.49
0.12	0.18	0.25	0.30	0.36
0.88	0.82	0.75	0.70	0.64

ตารางที่ 4.23 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.27	0.35	0.44	0.51
0.81	0.73	0.65	0.56	0.49
0.12	0.18	0.25	0.30	0.36
0.88	0.82	0.75	0.70	0.64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.24 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา
ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.27	0.35	0.44	0.51
0.81	0.73	0.65	0.56	0.49
0.12	0.18	0.25	0.30	0.36
0.88	0.82	0.75	0.70	0.64

ตารางที่ 4.25 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา
ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.27	0.35	0.44	0.51
0.81	0.73	0.65	0.56	0.49
0.12	0.18	0.25	0.30	0.36
0.88	0.82	0.75	0.70	0.64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.26 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h				
	ชุดข้อมูลที่ 1	ชุดข้อมูลที่ 2	ชุดข้อมูลที่ 3	ชุดข้อมูลที่ 4	ชุดข้อมูลที่ 5
0.10	1	1	1	1	1
0.50	1	1	1	1	1
0.75	1	1	1	1	2
0.90	1	1	2	2	3
0.92	1	1	2	2	3
0.94	1	2	3	4	5
0.96	1	2	3	4	5
0.98	1	2	3	4	5
0.99	1	2	3	4	5
1.00	1	2	3	4	5

ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h ข้อมูลการเลี้ยวซ้ายของทั้ง 3 ชุดข้อมูล ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 3

ชุดข้อมูลที่ 2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

ชุดข้อมูลที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 7

ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.27 ถึง ตารางที่ 4.36 และแสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ ดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.27 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.86	-	-
0.26	-	-
0.63	-	-

ตารางที่ 4.28 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.86	-	-
0.26	-	-
0.63	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.29 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.86	-	-
0.26	-	-
0.63	-	-

ตารางที่ 4.30 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.86	-	-
0.26	-	-
0.63	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.31 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.14	-
0.91	0.86	-
0.31	0.26	-
0.63	0.74	-

ตารางที่ 4.32 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.14	-
0.91	0.86	-
0.31	0.26	-
0.63	0.74	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.33 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.09	0.14
0.93	0.91	0.86
0.37	0.31	0.26
0.63	0.69	0.74

ตารางที่ 4.34 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.09	0.14
0.93	0.91	0.86
0.37	0.31	0.26
0.63	0.69	0.74

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.35 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.09	0.14
0.93	0.91	0.86
0.37	0.31	0.26
0.63	0.69	0.74

ตารางที่ 4.36 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.09	0.14
0.93	0.91	0.86
0.37	0.31	0.26
0.63	0.69	0.74

ตารางที่ 4.37 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 7 Km/h		
	ชุดข้อมูลที่ 1	ชุดข้อมูลที่ 2	ชุดข้อมูลที่ 3
0.10	1	1	1
0.50	1	1	1
0.75	1	1	1
0.90	1	1	1
0.92	1	1	2
0.94	1	1	2
0.96	1	2	3
0.98	1	2	3
0.99	1	2	3
1.00	1	2	3

ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h ข้อมูลการเลี้ยวซ้ายของทั้ง 3 ชุดข้อมูล ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 3

ชุดข้อมูลที่ 2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 5

ชุดข้อมูลที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 7

ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.38 ถึง ตารางที่ 4.47 และแสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ ดังตารางที่ 4.48

ตารางที่ 4.38 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.10		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.87	-	-
0.12	-	-
0.72	-	-

ตารางที่ 4.39 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.50		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.87	-	-
0.12	-	-
0.72	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.40 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.75		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	-	-
0.87	-	-
0.12	-	-
0.72	-	-

ตารางที่ 4.41 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.90		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.13	-
0.90	0.87	-
0.12	0.28	-
0.81	0.72	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.42 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.92		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.13	-
0.90	0.87	-
0.12	0.28	-
0.81	0.72	-

ตารางที่ 4.43 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.13	-
0.90	0.87	-
0.12	0.28	-
0.81	0.72	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.44 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.1	0.13
0.93	0.9	0.87
0.12	0.19	0.28
0.88	0.81	0.72

ตารางที่ 4.45 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.98		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.1	0.13
0.93	0.9	0.87
0.12	0.19	0.28
0.88	0.81	0.72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.46 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.99		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.1	0.13
0.93	0.9	0.87
0.12	0.19	0.28
0.88	0.81	0.72

ตารางที่ 4.47 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 7 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 1.00		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.07	0.1	0.13
0.93	0.9	0.87
0.12	0.19	0.28
0.88	0.81	0.72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.48 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h		
	ชุดข้อมูลที่ 1	ชุดข้อมูลที่ 2	ชุดข้อมูลที่ 3
0.10	1	1	1
0.50	1	1	1
0.75	1	1	1
0.90	1	1	2
0.92	1	1	2
0.94	1	1	2
0.96	1	2	3
0.98	1	2	3
0.99	1	2	3
1.00	1	2	3

จากการฝึกสอนเครือข่ายที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ต่างๆ พบว่า ความละเอียดของการแบ่งกลุ่ม กำหนดโดยค่าพารามิเตอร์สอดส่อง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่าน้อย ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะน้อย ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลน้อย แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะกว้าง ในทางตรงข้ามหากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่ามาก ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะสูง ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลมากขึ้น แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะแคบลง

การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h สามารถคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ 4 รูปแบบ ตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h สามารถคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ 5 รูปแบบ ตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94

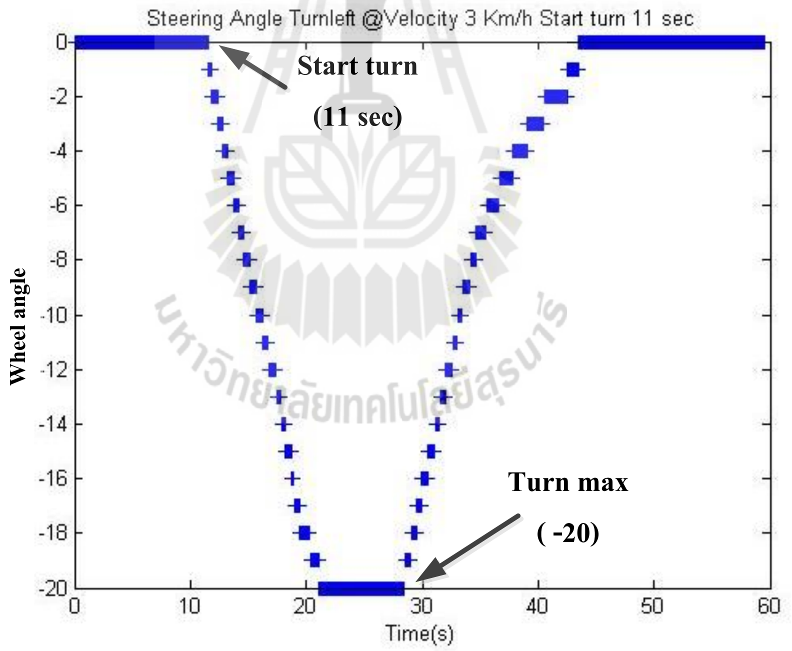
การเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h สามารถคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ 3 รูปแบบ ตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

การเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h สามารถคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ 3 รูปแบบ ตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.96

4.3.3 กระบวนการใช้งานเครือข่ายทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว

สำหรับกระบวนการใช้งานเครือข่าย ART จะถูกเรียกใช้ในขั้นตอนการฝึกสอนการควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยข้อมูลใหม่ ในการใช้งานเครือข่าย ART ต้องกำหนดสถานการณ์ให้เหมือนกันกับการฝึกสอนเครือข่าย ART โดยเริ่มต้นต้องนำรถไฟฟ้าจอดไว้ที่จุดจอดเริ่มต้น และเลือกความเร็วให้ตรงกับเครือข่าย ART ที่จะทำการใช้งาน เริ่มโปรแกรม พร้อมกับเริ่มขับรถออกตัวไปในทิศทางที่ต้องการได้ทันที หลังจากสิ้นสุดการควบคุมบังคับเลี้ยว อัลกอริทึมก็จะจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อระบุลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว ในขณะนั้นทันที หากข้อมูลดังกล่าวอยู่ในข้อกำหนดทุกอย่างแล้ว แต่ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มใดๆ แสดงว่าเป็นข้อมูลลักษณะพฤติกรรมการควบคุมการเลี้ยวแบบใหม่ ซึ่งอัลกอริทึมสามารถสร้างกลุ่มข้อมูลใหม่นั้นขึ้นมาได้ทันที

การใช้งานเครือข่าย ART ในการระบุลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h ทำการทดสอบตัวอย่างการใช้งานเครือข่าย ART โดยใช้ข้อมูลการเริ่มหักเลี้ยวที่เวลา วินาทีที่ 11 แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่ได้อยู่ในข้อมูลการฝึกสอน



รูปที่ 4.24 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวซ้ายกับเวลา ที่ความเร็ว 3 Km/h เริ่มเลี้ยววินาทีที่ 11

ผลจัดการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว คือข้อมูลดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 ถึงแม้ว่าข้อมูลดังกล่าวไม่ได้ทำการฝึกสอนไว้ แต่ระบบสามารถระบุกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ และถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 เพราะข้อมูลดังกล่าวมีความคล้ายอย่างเพียงพอที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94

ตัวอย่างการสร้างกลุ่มใหม่ของเครือข่าย ART

นอกจากการแบ่งกลุ่มข้อมูลแล้ว คุณสมบัติที่โดดเด่นอีกอย่างหนึ่งของเครือข่าย ART คือ ความสามารถในการสร้างกลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่ เมื่อเครือข่าย ART เรียนรู้ และแบ่งกลุ่มข้อมูลแล้ว หากป้อนข้อมูลใหม่ ให้เครือข่าย ART จัดกลุ่มข้อมูลเพื่อหาว่าข้อมูลใหม่นั้น ถูกจัดอยู่ในกลุ่มข้อมูลกลุ่มใด เครือข่าย ART สามารถระบุกลุ่มข้อมูลได้ทันที และหากข้อมูลใหม่นั้นไม่เข้าข่ายกลุ่มข้อมูลใดๆ ที่เครือข่าย ART เรียนรู้มาก่อนนั้น อัลกอริทึมเครือข่าย ART สามารถเรียนรู้และสร้างกลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่นั้นขึ้นมาได้ทันที

แสดงตัวอย่างการสร้างกลุ่มใหม่ของเครือข่าย ART โดยใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 และชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่าย ART คือชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h 3 ชุดข้อมูล ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 10 แสดงดังรูป 4.10

ชุดข้อมูลที่ 2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 20 แสดงดังรูป 4.12

ชุดข้อมูลที่ 3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 30 แสดงดังรูป 4.14

ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 แสดงดังตารางที่ 4.49 และแสดงผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 ผลที่ได้ คือ จัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ดังตารางที่ 4.50

ตารางที่ 4.49 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94		
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3
0.19	0.35	0.51
0.81	0.65	0.49
0.12	0.25	0.36
0.88	0.75	0.64

ตารางที่ 4.50 ผลการฝึกสอนการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h		
	ชุดข้อมูลที่ 1	ชุดข้อมูลที่ 2	ชุดข้อมูลที่ 3
0.94	1	2	3

ทำการทดสอบการใช้งานเครือข่ายที่ฝึกสอนเสร็จแล้ว โดยนำชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ที่ไม่ได้ทำการฝึกสอน อีก 2 ชุดข้อมูล ส่งเข้าไปที่เครือข่าย ได้แก่

ชุดข้อมูลที่ 4 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 15 แสดงดังรูป 4.11

ชุดข้อมูลที่ 5 การควบคุมบังคับเลี้ยวเริ่มหักเลี้ยว วินาทีที่ 25 แสดงดังรูป 4.13

จากการทดสอบการใช้งานเครือข่ายโดยนำข้อมูล 2 ชุดดังกล่าวส่งเข้าไปในเครือข่าย ค่าน้ำหนักประสาทจากการเรียนรู้ของเครือข่าย ART สำหรับการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94 แสดงดังตารางที่ 4.51 และแสดงผลการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 ผลที่ได้ พบว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด ไม่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่มีอยู่แล้วทั้ง 3 กลุ่ม เนื่องจากไม่มีความคล้ายเพียงพอที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94 ดังนั้นเครือข่ายจึงทำการสร้างกลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่ขึ้นมาอีก 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 ดังตารางที่ 4.52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.51 ค่าน้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94

น้ำหนักประสาท รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ที่ความเร็ว 3 Km/h ค่าพารามิเตอร์สอดส่องเท่ากับ 0.94				
รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 1	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 2	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 3	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 4	รูปแบบการบังคับเลี้ยว แบบที่ 5
0.19	0.35	0.51	0.27	0.44
0.81	0.65	0.49	0.73	0.56
0.12	0.25	0.36	0.18	0.30
0.88	0.75	0.64	0.82	0.70

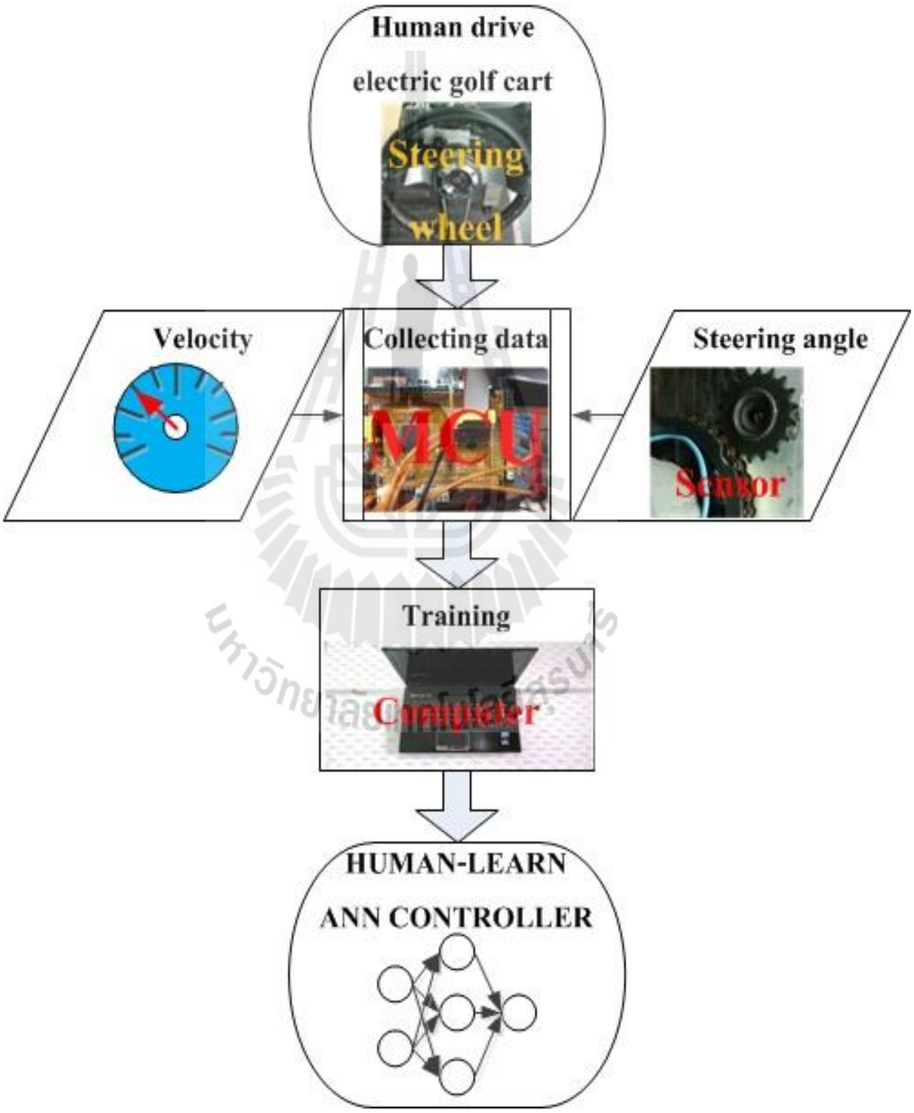
ตารางที่ 4.52 ผลการทดสอบการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 Km/h ที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง เท่ากับ 0.94

ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง	รูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 Km/h	
	ชุดข้อมูลที่ 4	ชุดข้อมูลที่ 5
0.94	4	5

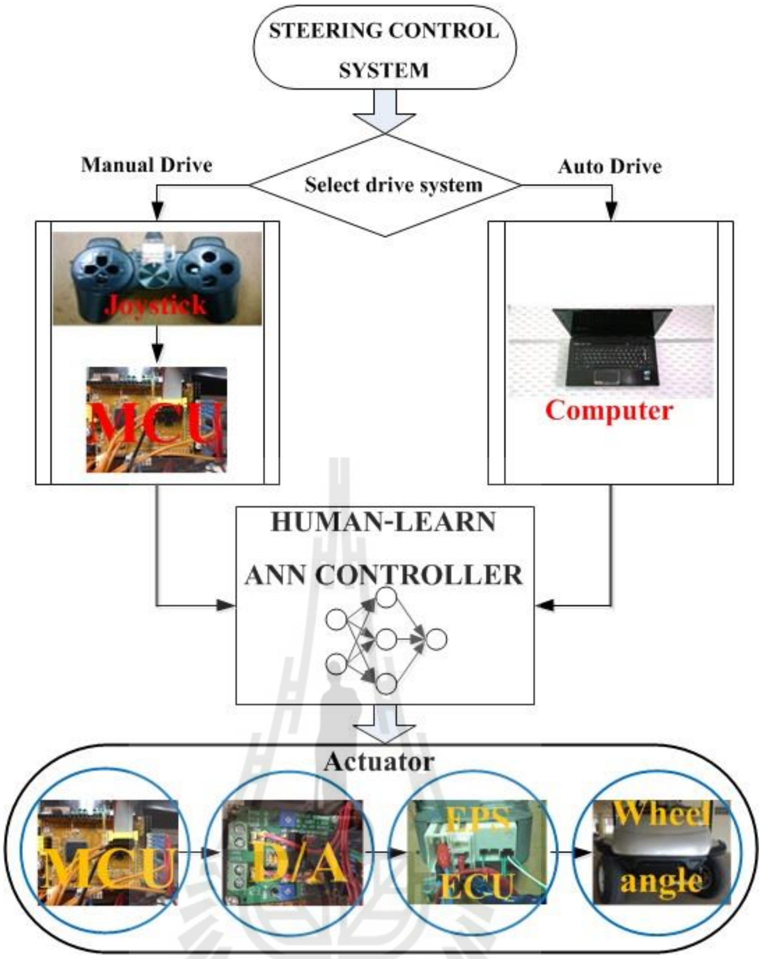
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว

การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว คือ การหาค่าความเหมาะสมให้กับระบบ แล้วนำมาใช้งานจริงในการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า แสดงแผนภาพโดยรวมของงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว ส่วนการฝึกสอนระบบ ดังรูปที่ 4.25 และส่วนการใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 แผนภาพโดยรวมของงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว ในส่วนการฝึกสอนระบบ



รูปที่ 4.26 แผนภาพโดยรวมของงานวิจัยการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว ในส่วนการใช้งานจริง

สำหรับการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการควบคุมบังคับเลี้ยว ทั้งแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) และแบบอัตโนมัติ ทั้งสองแบบใช้โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายไปข้างหน้า (feed forward) แบบหลายชั้นที่มีการฝึกสอน โดยใช้อัลกอริทึมแบบแพร่กลับ (back-propagation) ในการเรียนรู้ แผนผังการเรียนรู้แสดงดังรูปที่ 6 หากพิจารณาเครือข่าย N ชั้น เอาต์พุตของชั้นนั้นจะเป็นอินพุตให้ชั้นถัดไป แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 และฟังชั่นถ่ายโอนที่ใช้ดังแสดงในสมการ 3, 4, 5

$$y^{l+1} = f^{l+1}(W^{l+1}y^{l} + b^{l+1}) \tag{2}$$

โดยที่ l คือ ชั้น (layer) มีค่าตั้งแต่ 0,1,2,…,N-1
(เมื่อ l =0 แล้ว $y^0 = p$)

p คือ อินพุตของเครือข่าย
y^l คือ เอาต์พุตของเครือข่ายชั้นที่ l
f^l คือ ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของเครือข่ายชั้นที่ l
w^l คือ น้ำหนักประสาทของเครือข่ายชั้นที่ l
b^l คือ ไบอัสของเครือข่ายชั้นที่ l
y^n คือ เอาต์พุตของเครือข่าย

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนซิกมอยแบบลอการิทึม

$$y = \frac{1}{1+e^{-n}} \tag{3}$$

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเปอร์โบลาร์

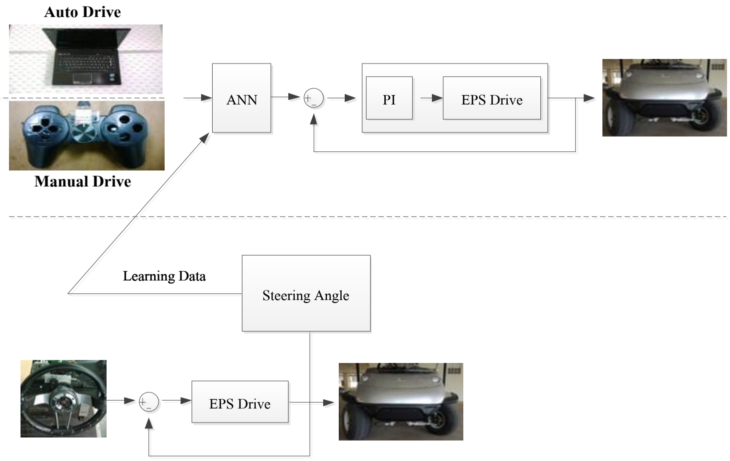
$$y = \frac{e^{n} - e^{-n}}{e^{n} + e^{-n}} \tag{4}$$

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเส้นตรง

$$y = n \tag{5}$$

โดยที่ y คือ เอาต์พุตของฟังก์ชันถ่ายโอน
n คือ อินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.27 แผนผังการเรียนรู้ และการใช้งานจริงของการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม

4.4.1 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย)

จากที่กล่าวแล้วในเนื้อหาวิทยานิพนธ์บทที่ 3 ในการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบพีไอนั้น พบว่า ระบบสามารถลู่เข้าสู่เป้าหมายอิงได้เป็นอย่างดีแล้ว แต่มุมเลี้ยวที่เกิดขึ้นในระหว่างการควบคุมบังคับเลี้ยวนั้นค่อนข้างมีความไม่ราบรื่น ดังนั้น จึงต้องอาศัยการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์ที่ขับโดยพวงมาลัยจริง เพื่อเป็นต้นแบบให้กับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมในการฝึกสอนระบบ ซึ่งกำหนดให้มนุษย์ขับรถไฟฟ้าทั้งแบบที่ใช้พวงมาลัย และแบบใช้อุปกรณ์ควบคุมไปบนถนนจริงตามข้อกำหนด คือ ความเร็วของรถกอล์ฟไฟฟ้าต้องคงที่ขณะทำการฝึกสอน โค้งหรือแยกที่ต้องการฝึกสอน ทำการเก็บข้อมูลมุมเลี้ยวจากการขับทั้ง 2 แบบ ที่โค้งหรือแยกนั้นๆ ตามรูปแบบที่กำหนด หลังจากนั้นนำข้อมูลมุมเลี้ยวที่ได้ ส่งให้กับเครือข่ายประสาทเทียม ทำการเรียนรู้ และจดจำ โดยเลือกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากการขับด้วยพวงมาลัยที่ต้องการเป็นต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมแม็ทแล็ป ในการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมสถาปัตยกรรมแบบไปข้างหน้า โดยใช้คำสั่ง newff และการฝึกสอนเครือข่าย ใช้กฎการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

สำหรับแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยวกำหนดรูปแบบการขับเป็น 4 รูปแบบ จัดเป็น 4 เครือข่าย ดังนี้

1. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h

2. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h

3. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h

4. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h

เป้าหมาย (target) การฝึกสอนของแต่ละเครือข่าย สามารถเลือกได้จากชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว ดังนี้

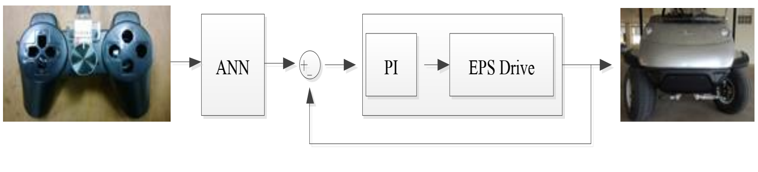
1. เครือข่ายรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h จำนวน 4 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5, 10, 15, และ 20 แสดงดังรูปที่ 4.9

2. เครือข่ายรูปแบบการขับการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h จำนวน 5 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 แสดงดังรูปที่ 4.15

3. เครือข่ายรูปแบบการขับการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h จำนวน 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5 และ 7 แสดงดังรูปที่ 4.19

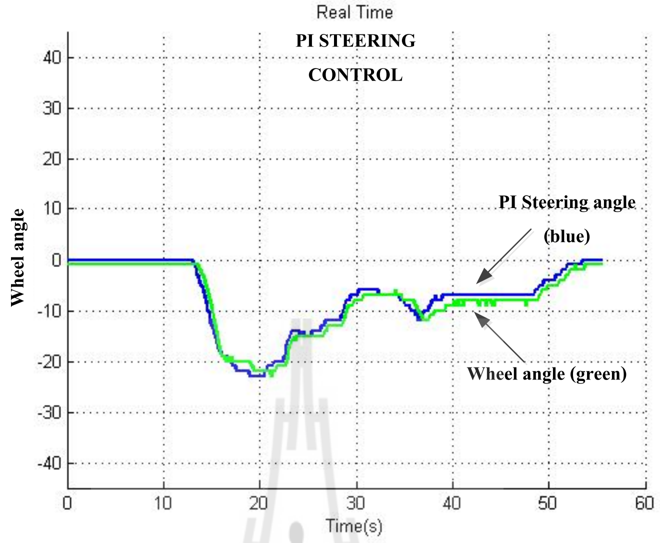
4. เครือข่ายรูปแบบการขับการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h จำนวน 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5 และ 7 แสดงดังรูปที่ 4.23

การทำงานจริง สำหรับแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว คือ เมื่อผู้ควบคุมทำการบังคับเลี้ยวด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยว ค่ามุมอ้างอิงนั้นจะถูกส่งผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และต่อไปที่คอมพิวเตอร์เพื่อส่งเข้าไปที่เครือข่ายประสาทเทียมที่ได้ทำการฝึกสอนไว้แล้ว เครือข่ายประสาทเทียมจะทำหน้าที่ในการปรับ และชดเชยค่ามุมการเลี้ยวนั้นๆให้ได้ตามพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ได้รับการเรียนรู้มาก่อนหน้านี้ จากนั้นส่งค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านการปรับชดเชยแล้วนั้นออกไปเป็นค่าเป้าหมายอ้างอิงให้กับระบบทำงานต่อไป แสดงการทำงานของระบบควบคุมดังรูปที่ 4.28

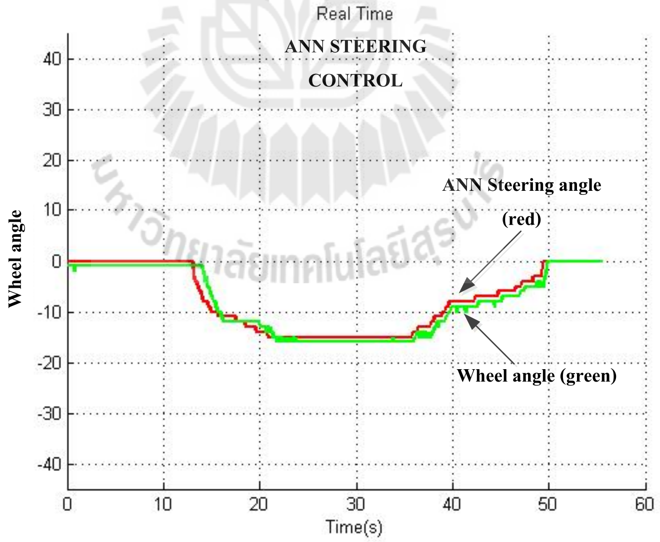


รูปที่ 4.28 การทำงานระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว

ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h เปรียบเทียบระหว่างแบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม กับแบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม

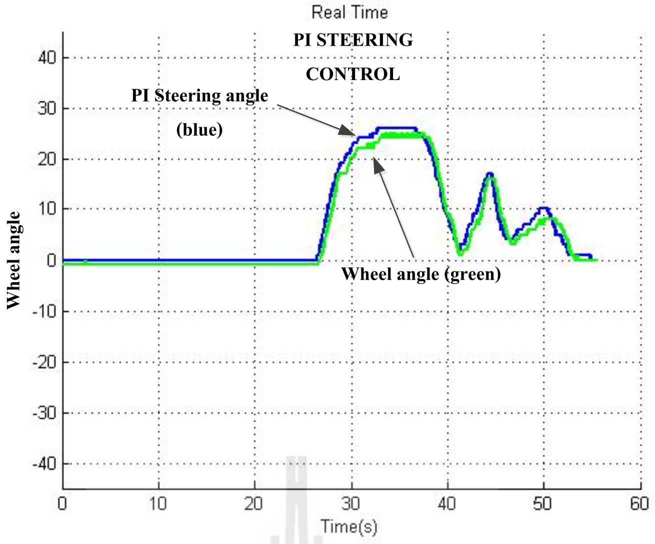


ก. แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

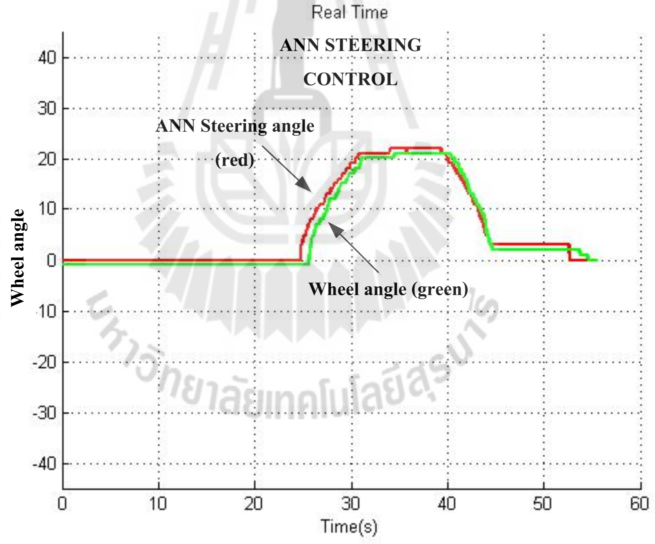


ข. แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 Km/h แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ก) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ข) (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว) (เส้นกราฟสีแดง คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยวที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม)

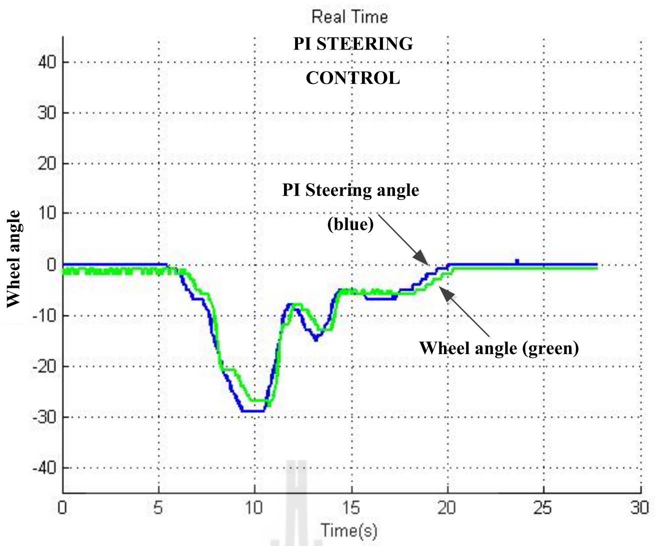


ก. แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

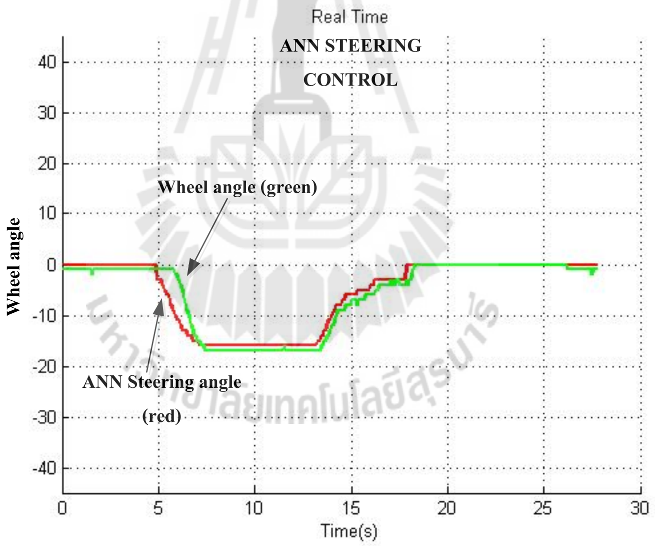


ข. แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 Km/h แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ก) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ข) (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว) (เส้นกราฟสีแดง คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยวที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม)

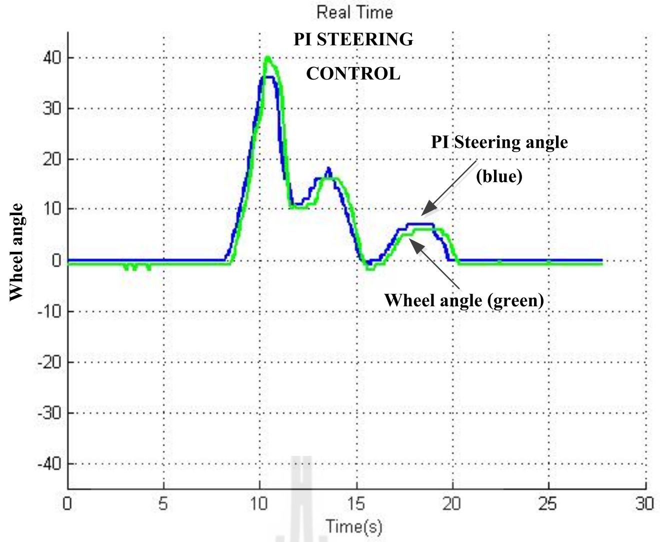


ก. แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

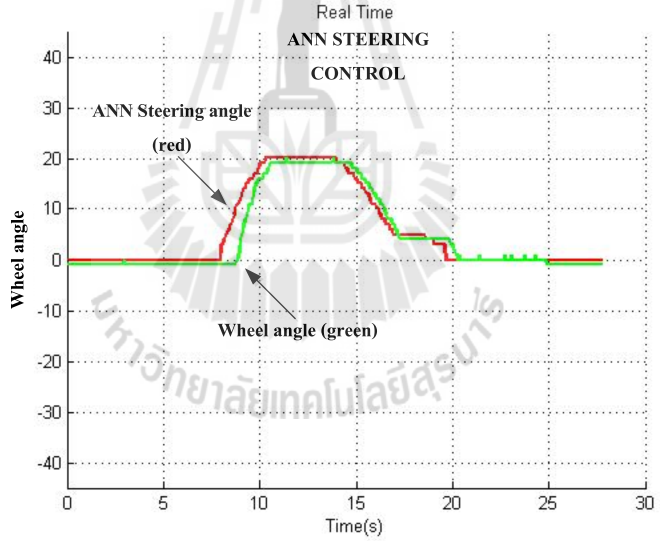


ข. แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 Km/h แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ก) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ข) (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว) (เส้นกราฟสีแดง คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยวที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม)



ก. แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม



ข. แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 Km/h แบบไม่ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ก) แบบใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ข) (เส้นกราฟสีเขียว คือ มุมเลี้ยวจริง) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยว) (เส้นกราฟสีแดง คือ มุมเลี้ยวจากอุปกรณ์บังคับเลี้ยวที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม)

ผลจากการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยวก่อนการฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม พบว่า การควบคุมบังคับเลี้ยวค่อนข้างยาก เนื่องจาก ความเคยชินที่ได้รับจากการขับรถด้วยพวงมาลัยมาโดยตลอด ทำให้รู้สึกไม่ชินกับการขับรถไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยวและส่งผลโดยตรงในการกำหนดทิศทางมุมเลี้ยว ซึ่งยังไม่มีความเหมาะสมเท่าที่ควรกับการเลี้ยวที่โค้งหรือแยกนั้นๆ ทำให้การบังคับเลี้ยวค่อนข้างส่ายไปมา

แต่หลังจากทำการฝึกสอนระบบการควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแล้ว ทำการขับรถไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยวผ่านเครือข่ายประสาทเทียม พบว่า การควบคุมบังคับเลี้ยวมีความเหมาะสมสำหรับโค้งหรือแยกนั้นๆมากขึ้นกว่าการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าก่อนฝึกสอนระบบด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และได้รับความรู้สึกจากผลการตอบสนองใกล้เคียงกับการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าด้วยพวงมาลัยจริง แสดงการเปรียบเทียบการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าทดสอบดังรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32

4.4.2 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ

ในการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ เป็นการปล่อยให้รถกอล์ฟไฟฟ้าควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยตัวเอง ตั้งแต่เริ่มต้นจากจุดจอดจนสิ้นสุดการเลี้ยวด้วยความเร็วคงที่ (3 และ 7 Km/h) โดยสามารถเลือกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ตามข้อมูลฝึกสอนต้นแบบจากมนุษย์ ซึ่งกำหนดให้มนุษย์ขับรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบใช้พวงมาลัย ไปบนถนนจริงที่โค้งหรือแยกนั้นๆ ตามรูปแบบและข้อกำหนด หลังจากนั้นนำชุดข้อมูลมุมเลี้ยวที่ได้ ส่งให้กับเครือข่ายประสาทเทียม ทำการเรียนรู้ และจดจำ ในรูปแบบเครือข่ายประสาทเทียม

ในส่วนการสร้าง และฝึกสอนเครือข่าย ใช้โปรแกรมแม็ทแล็ปสร้างเครือข่ายประสาทเทียมสถาปัตยกรรมแบบไปข้างหน้าด้วยคำสั่ง newff และฝึกสอนเครือข่ายโดยใช้กฎการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

สำหรับแบบอัตโนมัติ กำหนดรูปแบบการขับเป็น 4 รูปแบบ ดังนี้

1. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h
2. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h
3. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h
4. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h

โดย ทั้ง 4 รูปแบบ จัดเป็น 2 เครือข่าย ได้แก่

1. เครือข่ายการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ประกอบด้วย 2 รูปแบบ ได้แก่

1.1 การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h

1.2 การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h

2. เครือข่ายการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา

2.1 การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h

2.2 การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h

เป้าหมาย (target) การฝึกสอนของแต่ละเครือข่าย ได้จากชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยว ดังนี้

1. เครือข่ายการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ได้แก่

1.1 รูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h จำนวน 4 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 5, 10, 15, และ 20 แสดงดังรูปที่ 4.9

1.2 รูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h จำนวน 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 แสดงดังรูปที่ 4.19

2. เครือข่ายการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ประกอบด้วย 2 รูปแบบการขับ ได้แก่

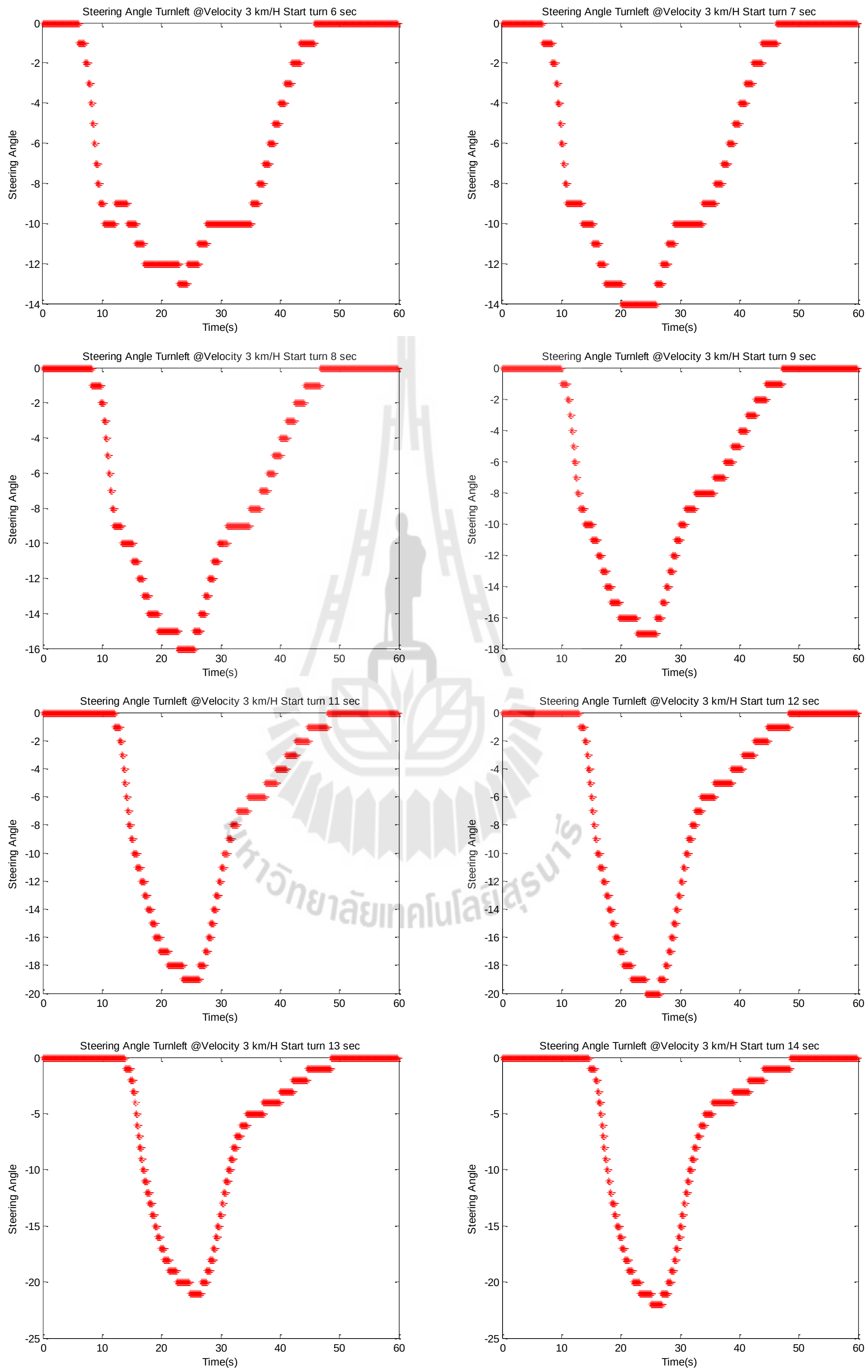
2.1 รูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h จำนวน 5 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5 และ 7 แสดงดังรูปที่ 4.15

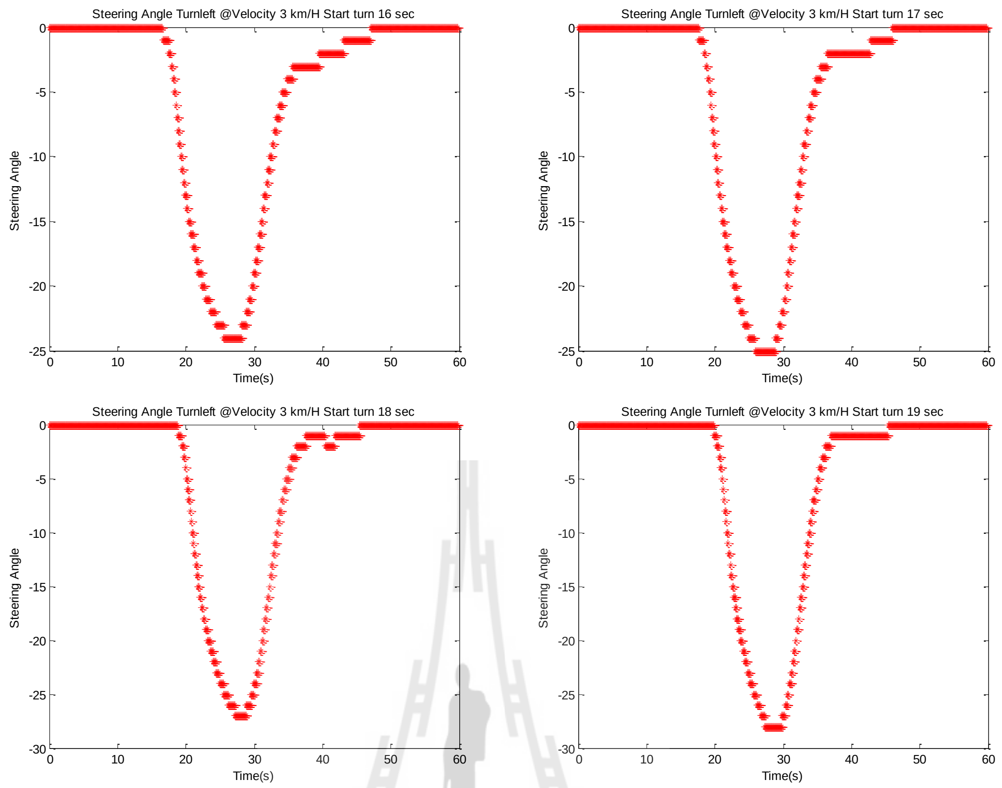
2.2 รูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h จำนวน 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลที่เริ่มหักเลี้ยววินาทีที่ 3, 5 และ 7 แสดงดังรูปที่ 4.23

สำหรับการฝึกสอนเครือข่าย ใช้เฉพาะรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากการขับด้วยพวงมาลัยบางส่วนเท่านั้น แล้วให้เครือข่ายสร้างรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่เป็นไปได้ของแต่ละเครือข่ายนั้นขึ้นมา

ผลการสร้างลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการควบคุมบังคับเลี้ยวแบบอัตโนมัติ

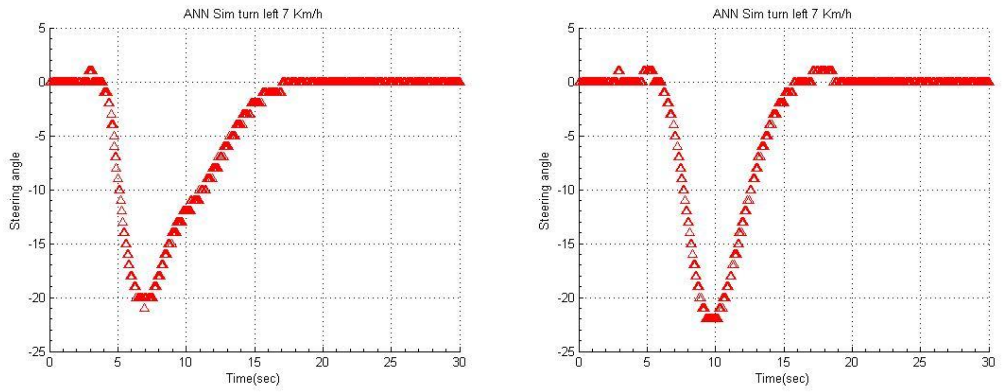
การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h แสดงดังรูป 4.33





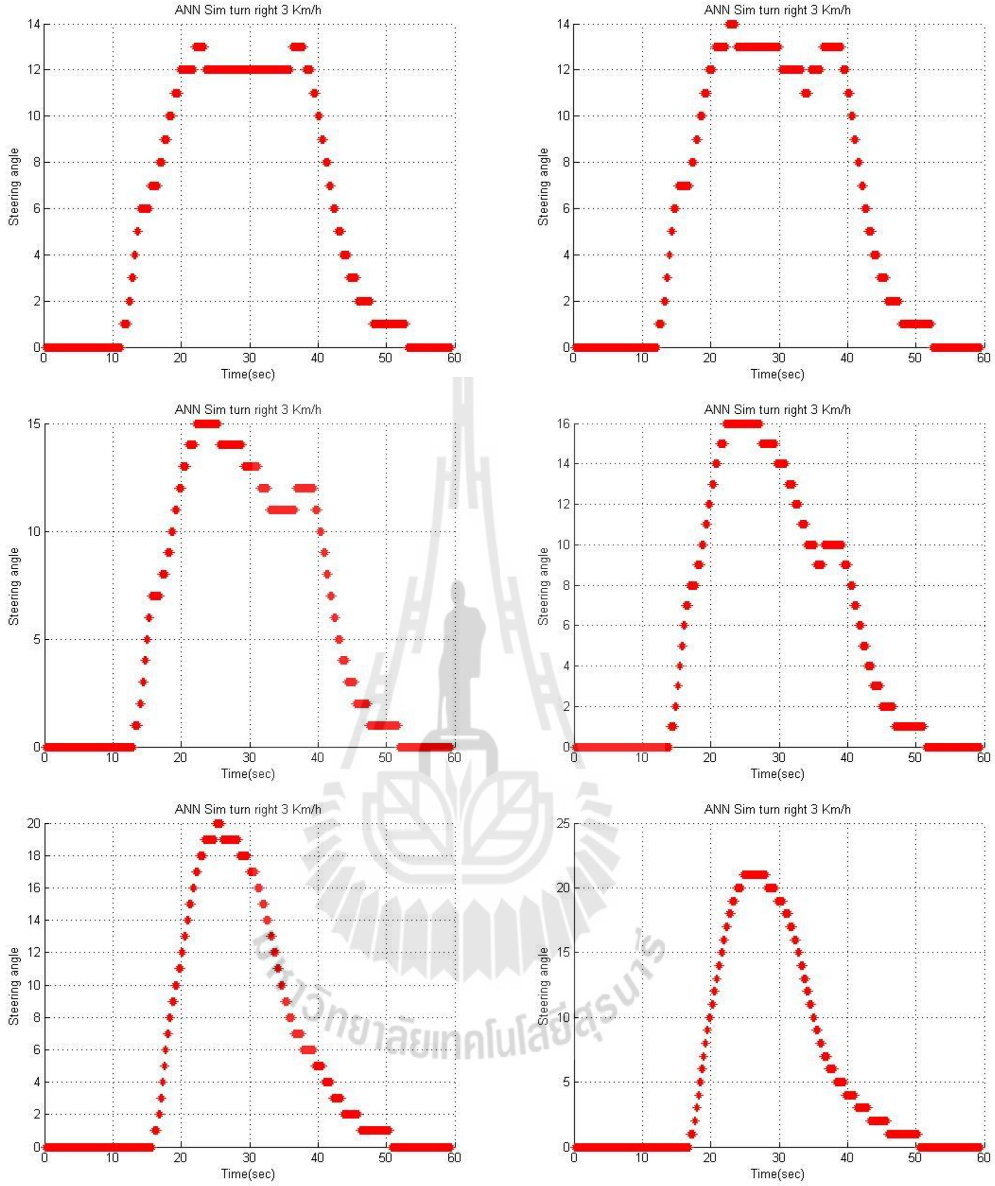
รูปที่ 4.33 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 3 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 6,7,8,9,11,12,13,14,16,17,18,19 ตามลำดับ)

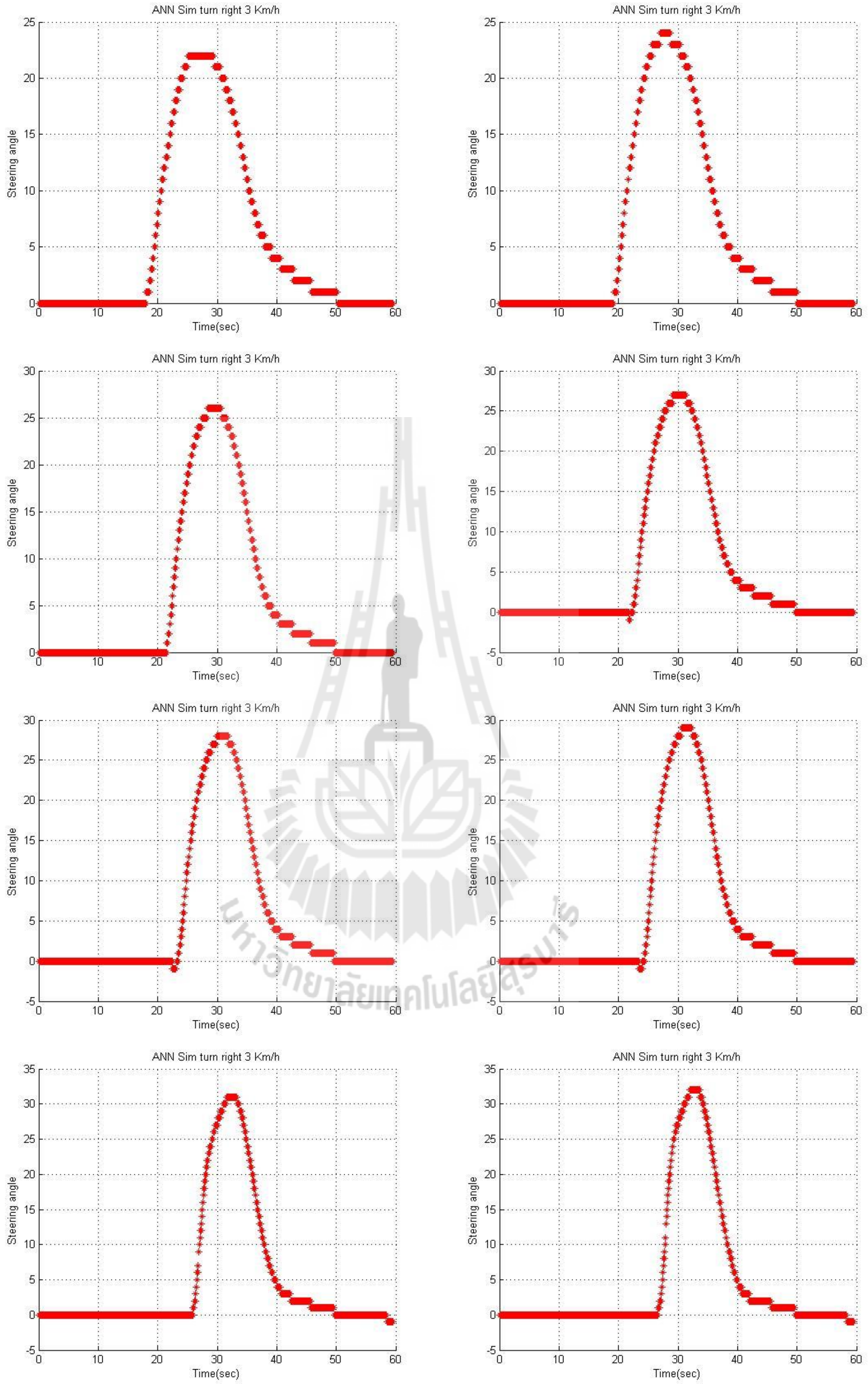
การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h แสดงดังรูป 4.34



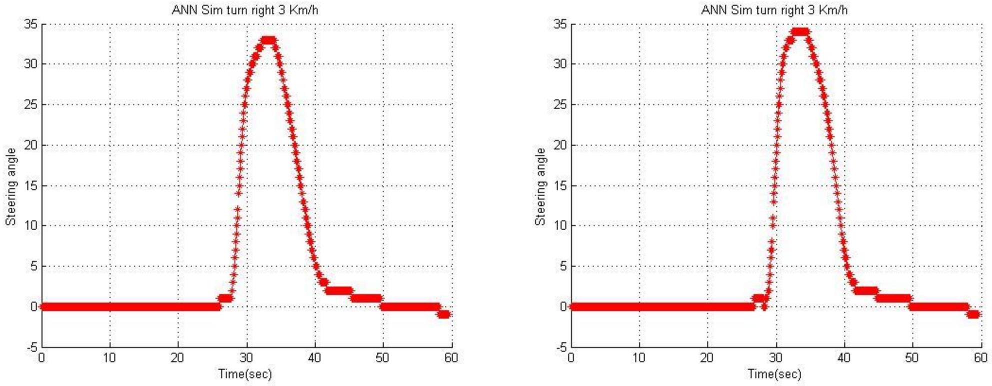
รูปที่ 4.34 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้าย ความเร็ว 7 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 4 และ 6 ตามลำดับ)

การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h แสดงดังรูป 4.35



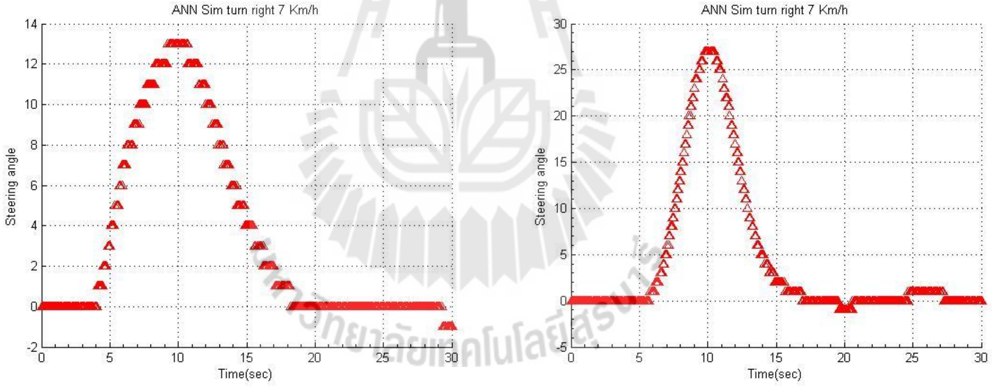


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.35 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 3 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 11,12,13,14,16,17,18,19,21,22,23,24,26,27, 28,29 ตามลำดับ)

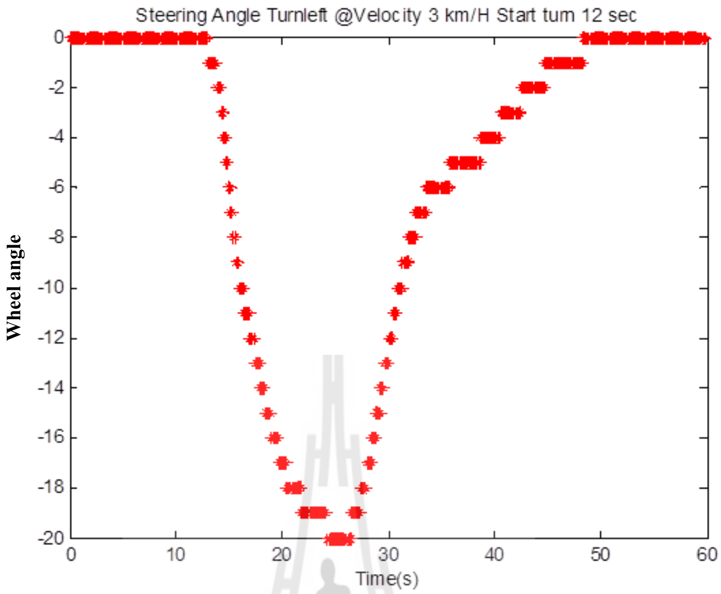
การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h แสดงดังรูป 4.36



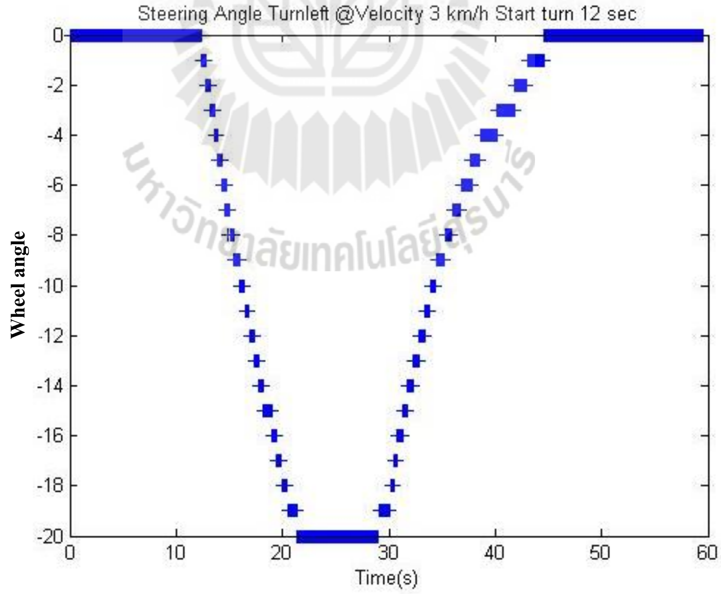
รูปที่ 4.36 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวขวา ความเร็ว 7 km/h ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ชุดข้อมูลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 4 และ 6 ตามลำดับ)

ถึงแม้การฝึกสอนข้อมูลต้นแบบของแต่ละเครือข่ายไม่ได้นำข้อมูลลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาฝึกสอนระบบ แต่หลังจากที่เครือข่ายได้เรียนรู้ จดจำ จากชุดข้อมูลการฝึกสอนดังกล่าวแล้ว ผลคือ เครือข่ายสามารถสร้างลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวส่วนที่เหลือที่เป็นไปได้ขึ้นมาได้ และเมื่อนำตัวอย่างรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับรูปแบบ

ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ขับบนถนนจริง โดยใช้พวงมาลัย พบว่ามุมเลี้ยวมากสุดมีค่าเท่ากันที่ -20 องศา และมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.37



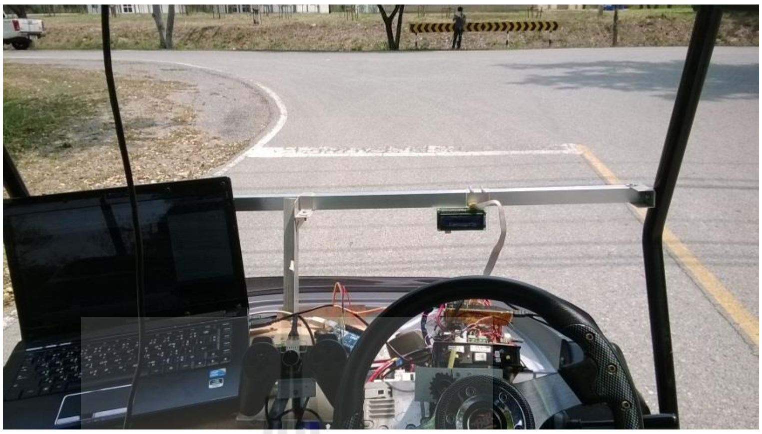
ก. ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม



ข. ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ขับจริงโดยใช้พวงมาลัย

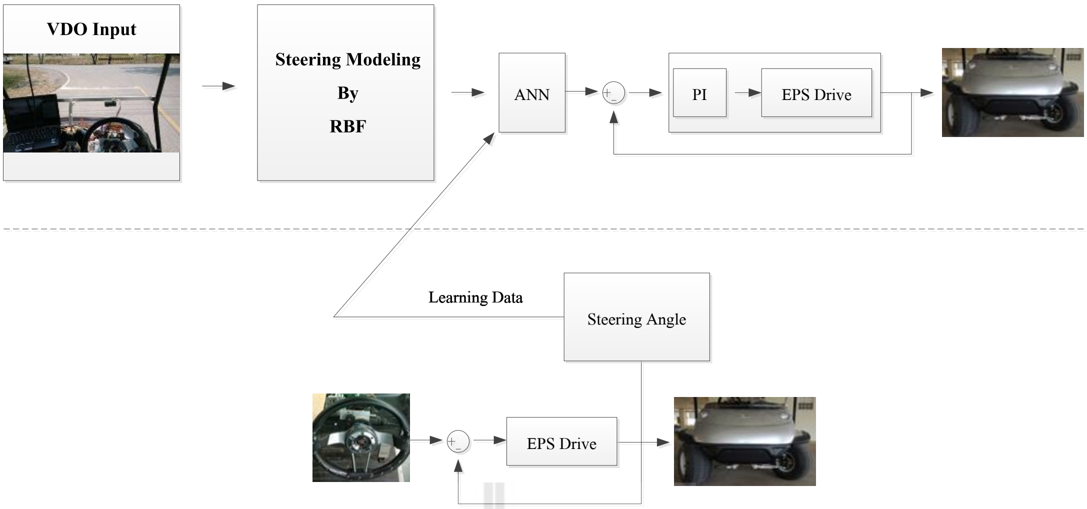
รูปที่ 4.37 ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เริ่มหักพวงมาลัยเลี้ยวที่เวลาวินาทีที่ 12 ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ก) และลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ขับจริงโดยใช้พวงมาลัย (ข)

4.4.3 การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว



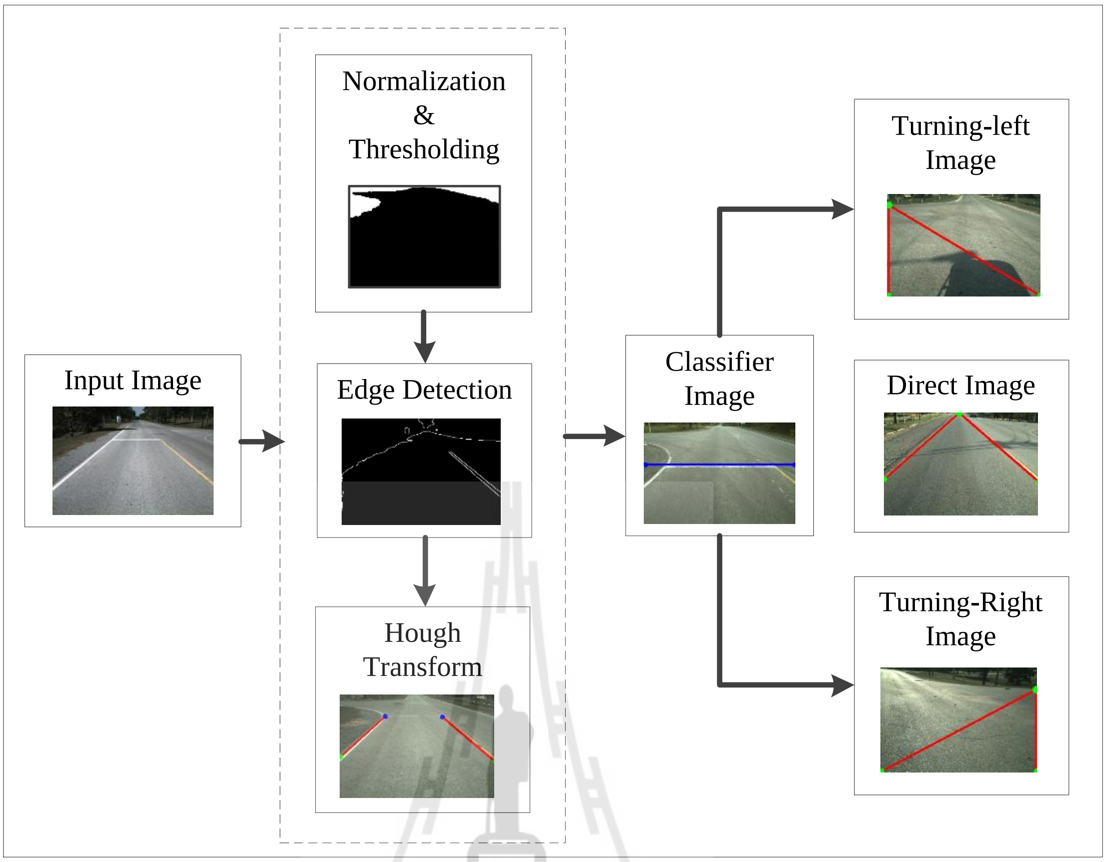
รูปที่ 4.38 มุมมองด้านหน้าจากภายในตัวรถกอล์ฟไฟฟ้า

ในการควบคุมแบบใช้การขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) ที่ใช้ร่วมกับเครือข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการการประมวลผลภาพเพื่อหาแบบจำลองการเลี้ยวในขณะที่กล้อง CCD ที่ติดตั้งอยู่ที่หน้ารถไฟฟ้าแบบไร้คนขับ (เทอดศิลป์ โสมูล (2012)) มาใช้เป็นค่ากำหนดมุมเลี้ยวอ้างอิง ให้กับระบบควบคุมพร้อมทั้งเป็นค่าอินพุตให้กับระบบควบคุม โดยกำหนดให้ระบบเรียนรู้ และจดจำ จากมนุษย์ เพื่อควบคุมการบังคับเลี้ยว ให้รถกอล์ฟไฟฟ้าแบบไร้คนขับสามารถบังคับเลี้ยวด้วยตัวเองแบบอัตโนมัติได้อย่างถูกต้อง พร้อมทั้งมีใกล้เคียงกับมนุษย์ และปลอดภัย ตามความเหมาะสมในการเลี้ยว



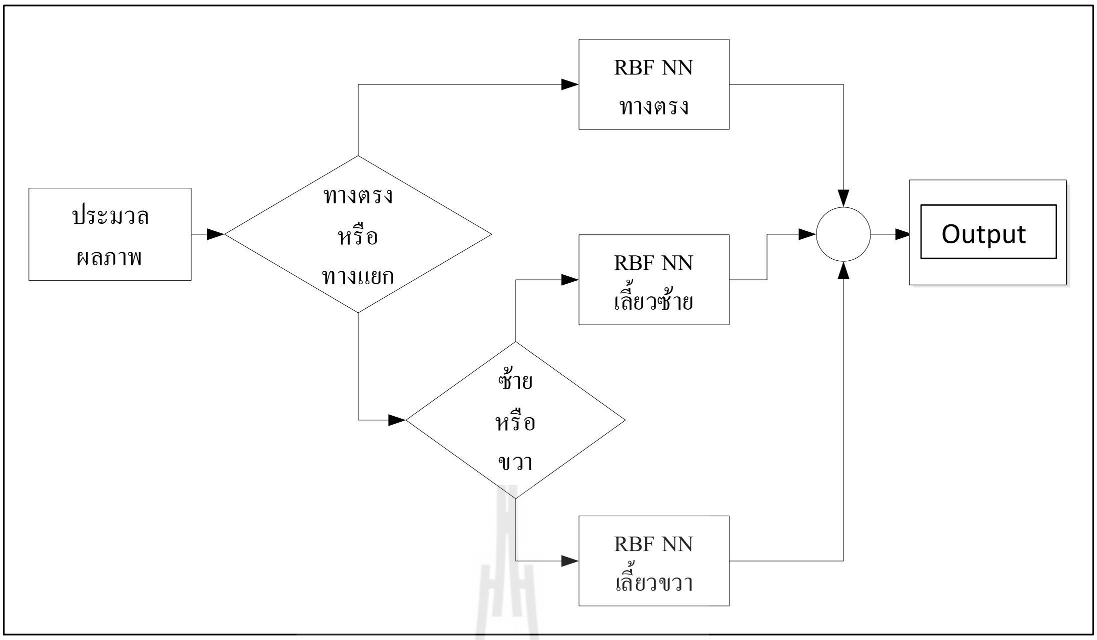
รูปที่ 4.39 แผนผังการทำงานการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม และวิชวลเซอร์โว

การทำงานของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.39 เริ่มจากการส่งข้อมูลภาพเข้าไปประมวลผลค้นหาช่องทางเดินรถ สำหรับใช้ในการหาจุดนำทางการเคลื่อนที่ เพื่อนำตำแหน่งจุดนำทางดังกล่าวมาใช้ออกแบบและสร้างแบบจำลองการเลี้ยวโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมชนิดเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (radian basis function : RBF) จากกระบวนการดังกล่าว ผลที่ได้ คือ จุดนำทางการเคลื่อนที่ และค่ามุมเลี้ยวแบบจำลองจากเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) แสดงแผนภาพการค้นหาช่องทางเดินรถ ดังรูปที่ 4.40 (เทอดศิลป์ โสมูล (2012)) ระบบการทำงานของแบบจำลองการเลี้ยวแสดงดังรูปที่ 4.41 (เทอดศิลป์ โสมูล (2012))



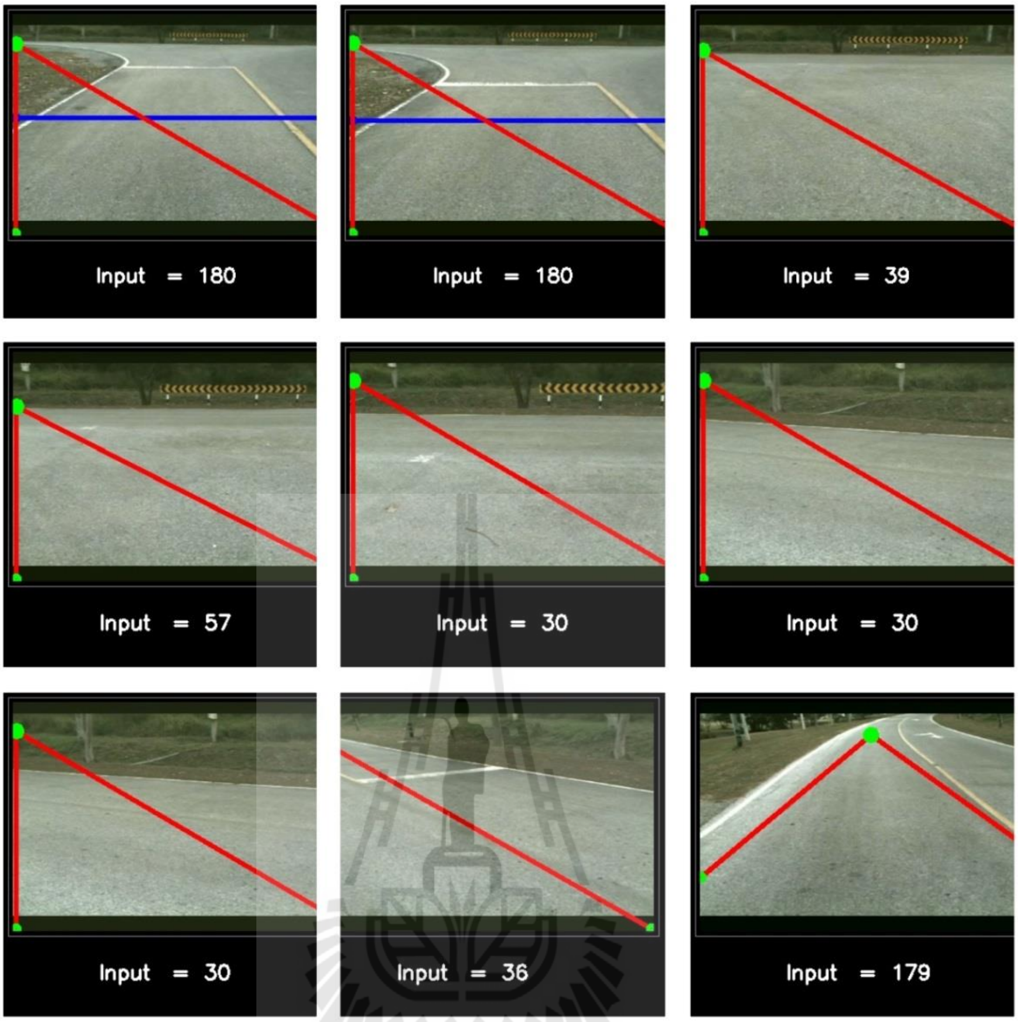
รูปที่ 4.40 ตัวอย่างผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนของระบบการค้นหาช่องทางเดินรถ (เทอดศิลป์ โสมูล (2012))

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

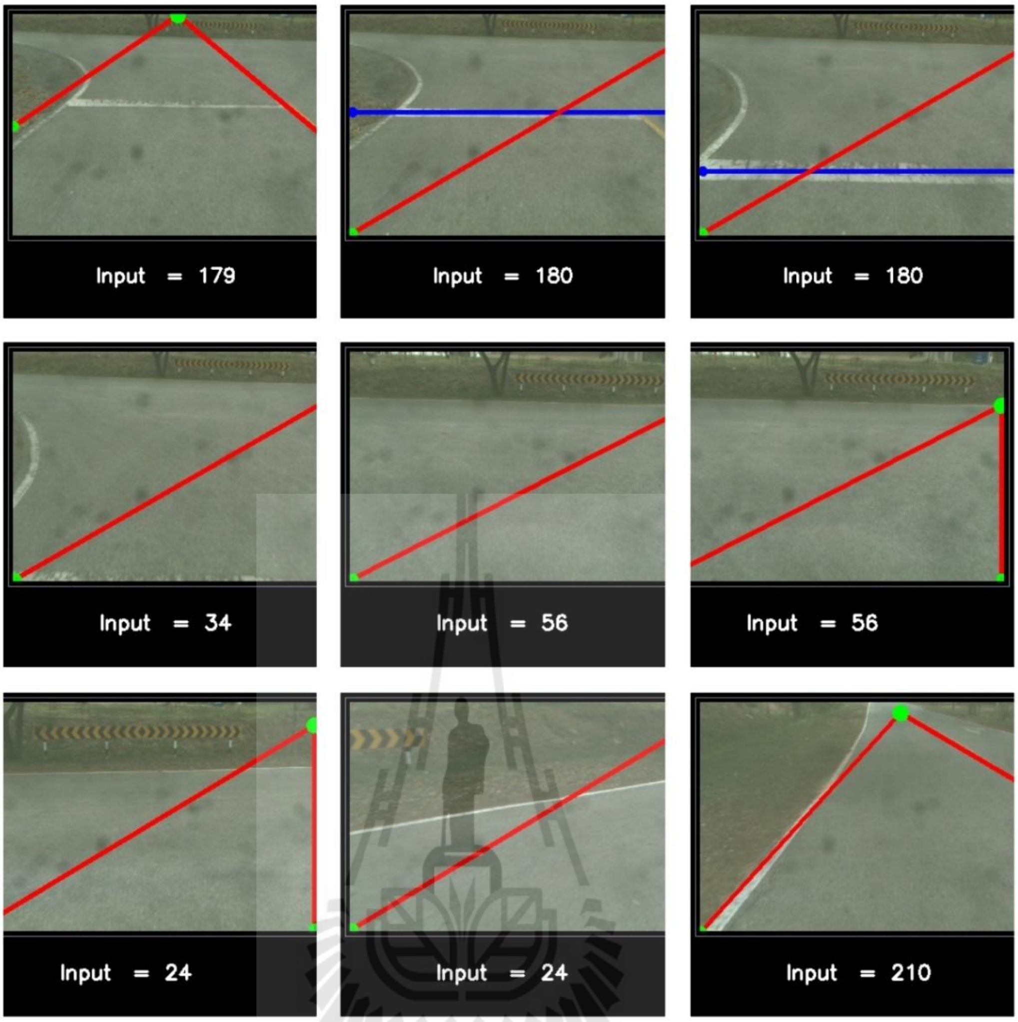


รูปที่ 4.41 ระบบการทำงานของแบบจำลองการเลี้ยว (เทอดศิลป์ โสมูล (2012))

ในงานวิจัยนี้ได้นำผลจากกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่และค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) มาใช้เป็นค่าอินพุทสำหรับฝึกสอนเครือข่ายระบบควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว และค่าเป้าหมายอ้างอิง (target) สำหรับฝึกสอนเครือข่าย ได้จากการกำหนดให้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้พวงมาลัยที่แยกการเลี้ยวนั้นๆ แล้วทำการเก็บค่าข้อมูลมุมเลี้ยวดังกล่าว แสดงการเก็บข้อมูลดังหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ที่ผ่านมา แสดงผลการค้นหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่ และค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ดังรูปที่ 4.42 และ 4.43



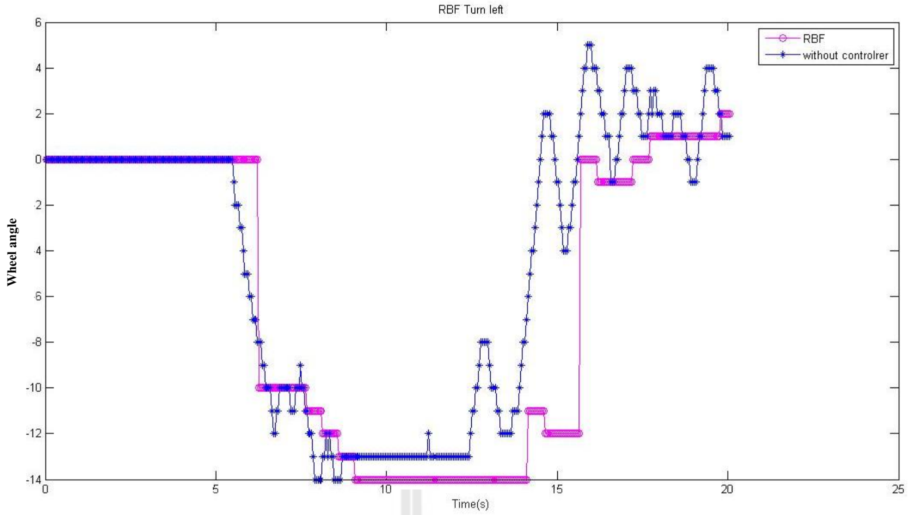
รูปที่ 4.42 ตัวอย่างผลการค้นหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่จากข้อมูลภาพ สำหรับการเลี้ยวซ้าย



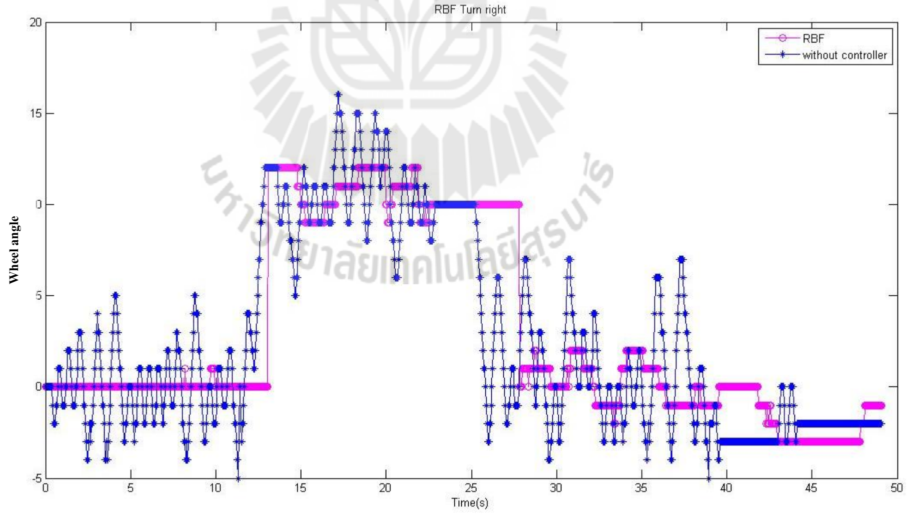
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างผลการค้นหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่จากข้อมูลภาพ สำหรับการเลี้ยวขวา

เนื่องจากค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) เป็นค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงของระบบ ซึ่งในการจำลองค่าอาจจะเป็นค่ามุมที่สามารถใช้สำหรับแยกการเลี้ยวนั้นๆ แต่ในการใช้งานจริง แต่ค่ามุมเลี้ยวบางจุดมีความแตกต่างกันมาก ถึงแม้ว่าระบบมีตัวควบคุมแบบพีไออยู่ภายในระบบแล้ว ระบบการควบคุมแบบใช้ตัวควบคุมพีไอ ทำหน้าที่ช่วยให้ระบบนั้นลู่เข้าสู่เป้าหมายที่อ้างอิง แต่ตัวควบคุมพีไอ ไม่สามารถช่วยกำหนดค่ามุมการเลี้ยวที่เหมาะสมเหมือนกับมนุษย์ให้กับระบบการควบคุมบังคับเลี้ยวได้ จึงกำหนดให้มนุษย์เป็นต้นแบบกำหนดมุมเลี้ยว และให้เครือข่ายประสาทเทียม เรียนรู้ จดจำ เพื่อนำไปใช้ควบคุมระบบบังคับเลี้ยว

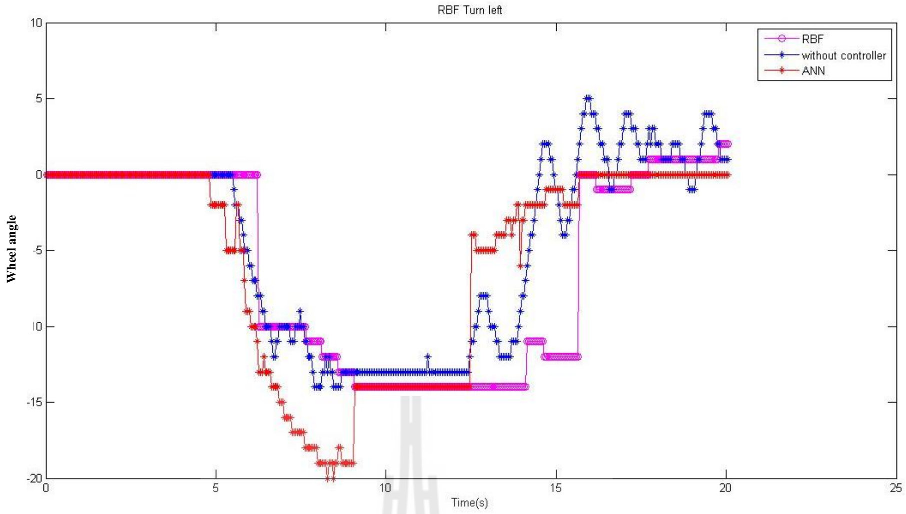
ผลการทดสอบการควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจากเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) (ทำการทดสอบเฉพาะ ความเร็ว 7 Km/h เท่านั้น)



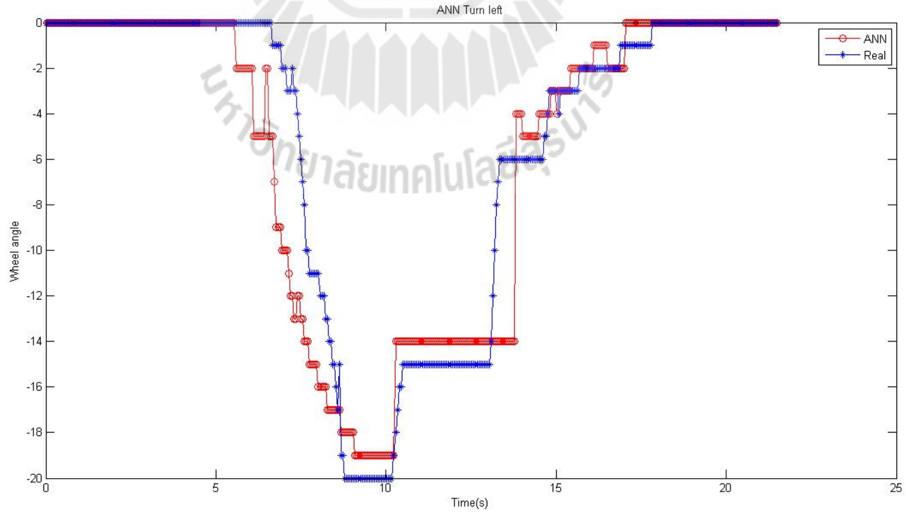
รูปที่ 4.44 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายด้วยค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF
(เส้นกราฟสีชมพู คือ ค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF)
(เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบปิด)



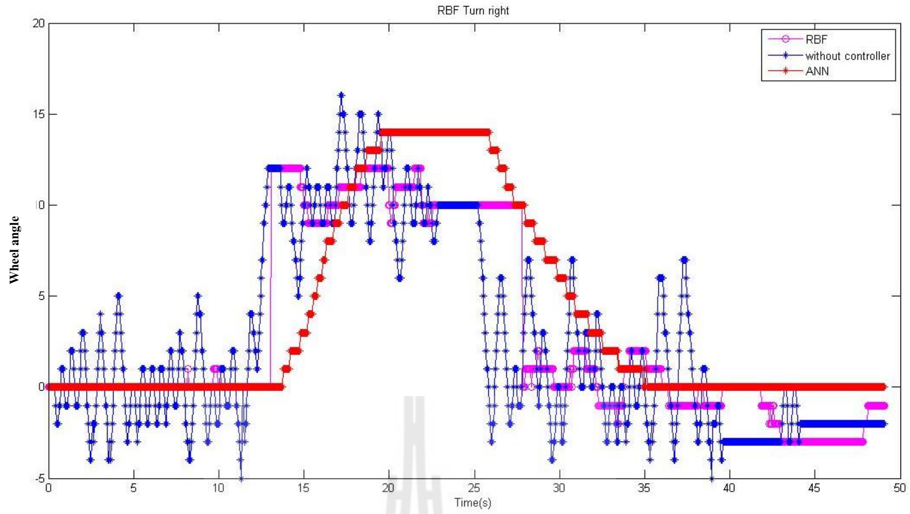
รูปที่ 4.45 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวขวาด้วยค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF
(เส้นกราฟสีชมพู คือ ค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF)
(เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบปิด)



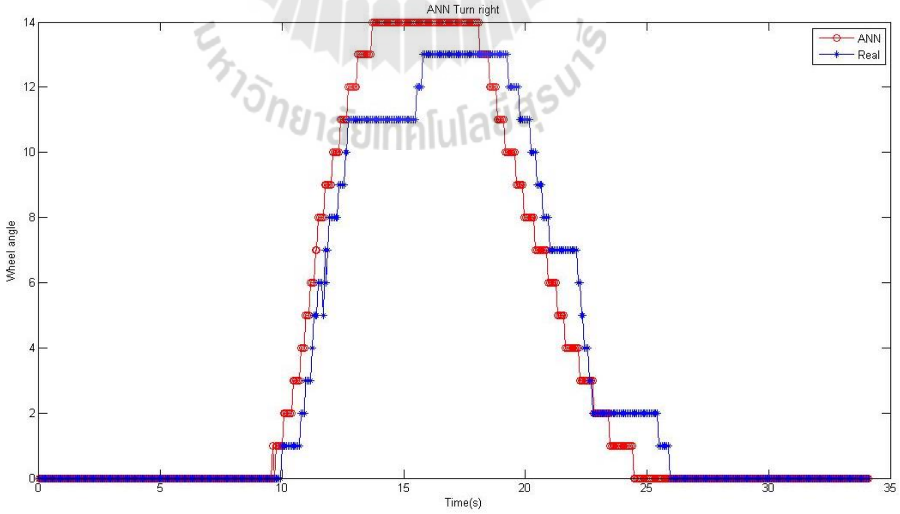
รูปที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวซ้าย (เส้นกราฟสีชมพู คือ ค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF)
(เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบปิด)
(เส้นกราฟสีแดง คือ ค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านการฝึกสอนจากเครือข่ายประสาทเทียม)



รูปที่ 4.47 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวจริงเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวซ้าย
(เส้นกราฟสีแดง คือ ค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านการฝึกสอนจากเครือข่ายประสาทเทียม)
(เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบพีไอ)



รูปที่ 4.48 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวขวา (เส้นกราฟสีชมพู คือ ค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF) (เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบปิด) (เส้นกราฟสีแดง คือ ค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านการฝึกสอนจากเครือข่ายประสาทเทียม)



รูปที่ 4.49 ผลการควบคุมบังคับเลี้ยวจริงเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวหลังจากฝึกสอนเครือข่ายกับค่ามุมเลี้ยวอ้างอิงจาก RBF สำหรับการเลี้ยวขวา

(เส้นกราฟสีแดง คือ ค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านการฝึกสอนจากเครือข่ายประสาทเทียม)
(เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ค่ามุมเลี้ยวจริงแบบใช้การควบคุมแบบพีไอ)

จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามุมเลี้ยวจาก RBF ค่อนข้างมีความแตกต่างกันมากในจังหวะการเริ่มเลี้ยว ส่งผลให้เกิดการหักเลี้ยวอย่างรวดเร็ว และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้การควบคุมแบบปิดโดยที่ไม่มีตัวควบคุมมาช่วย ยิ่งส่งผลให้เกิดการแกว่งมากขึ้น แต่หากใช้เครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยปรับค่ามุมเลี้ยวจาก RBF พร้อมทั้งใช้ตัวควบคุมแบบพีไอก็จะช่วยให้ค่ามุมเลี้ยวสำหรับการเลี้ยวนั้นๆ มีความใกล้เคียงกับการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์ที่ใช้พวงมาลัยจริง

4.5 สรุป

ในเนื้อหาวิทยานิพนธ์บทที่ 4 นี้ อธิบายถึงการดำเนินการนำเครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเพื่อฝึกสอนระบบให้สามารถเรียนรู้ จดจำ ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าจากมนุษย์ ซึ่งข้อมูลฝึกสอนได้จากการกำหนดให้มนุษย์ผู้ฝึกสอนต้นแบบขับรถกอล์ฟไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมบนถนนจริงโดยใช้พวงมาลัยขับแบบปกติ

สำหรับงานวิจัยนี้ ทำการกำหนดจัดรูปแบบการควบคุมบังคับเลี้ยวเป็น 4 แบบ ได้แก่

1. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 3 km/h
2. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 3 km/h
3. การควบคุมบังคับเลี้ยวซ้ายที่ความเร็ว 7 km/h
4. การควบคุมบังคับเลี้ยวขวาที่ความเร็ว 7 km/h

ในแต่ละรูปแบบจะมีการระบุ และคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวออกเป็นกลุ่มๆ เครื่องมือที่นำมาใช้ในการระบุและคัดแยกกลุ่มของลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว ได้แก่ ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (adaptive resonance theory: ART) โดยใช้ค่าจากเวลาที่เริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด เป็นค่าอินพุตของเครือข่าย ART ความละเอียดในการจัดแบ่งกลุ่มขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance) หากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่าน้อย ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะน้อย ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลน้อย แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะกว้าง หากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่ามาก ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะสูง ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลมากขึ้น แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะแคบลง และเมื่อส่งข้อมูลกลุ่มใหม่ที่เครือข่ายยังไม่ได้ เรียนรู้ จดจำ และยังไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มใดเลย เข้าไปในเครือข่าย ART เครือข่าย ART สามารถที่จะเรียนรู้กลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่ และสามารถระบุกลุ่มข้อมูลนั้นเพิ่มเติมใหม่ขึ้นมาได้ทันที

การควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม จัดแบ่งเป็น 2 ระบบการควบคุม ได้แก่

1. การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) การทำงานจริง คือ เมื่อผู้ควบคุมทำการบังคับเลี้ยวด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยว ค่ามุมอ้างอิงนั้นจะถูกส่งเข้าไปที่เครือข่ายประสาทเทียม ที่ได้ทำการฝึกสอนไว้แล้ว เครือข่ายประสาทเทียมจะทำหน้าที่ในการปรับ และชดเชยค่ามุมการเลี้ยวนั้นๆให้ได้ตามลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ได้รับการเรียนรู้มา

2. การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ ทำงานจริง คือ ทำการเลือกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ต้องไว้ จากนั้นเครือข่ายจะทำหน้าที่ส่งค่ามุมเลี้ยวที่ได้เรียนรู้ พร้อมทั้งควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยตัวเอง แม้ว่าข้อมูลการฝึกสอนเครือข่ายจะไม่ได้มีครบทุกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว แต่เครือข่ายก็ยังสามารถสร้างลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่เหลือนั้นขึ้นมาได้ และในส่วนของการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว กระบวนการทำงาน คือ การนำข้อมูลภาพเข้ามาประมวลผลหาค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่ และหาค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) จากนั้นสร้างเครือข่ายเพื่อฝึกสอนระบบโดยใช้ค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่ และหาค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) เป็นอินพุท และใช้ค่ามุมเลี้ยวจากมนุษย์เป็นต้นแบบเป้าหมาย ซึ่งช่วยให้การควบคุมบังคับเลี้ยวมีความใกล้เคียงกับมนุษย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าที่สามารถเลียนแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์ผู้ฝึกสอน เพื่อเป็นต้นแบบและใช้งานได้จริงในการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าทั้งแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) และแบบอัตโนมัติ โดยกระบวนการเริ่มต้น คือ การออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าขึ้นมา จากนั้นนำตัวควบคุมแบบพีไอเข้าไปในระบบควบคุม และกระบวนการสุดท้าย คือ การนำเครือข่ายประสาทเทียมเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อฝึกสอนระบบให้สามารถเรียนรู้ จดจำ ลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้าจากมนุษย์พร้อมทั้งการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ต่างกันได้ ตลอดจนสามารถฝึกสอนระบบด้วยข้อมูลฝึกสอนแบบใหม่ได้ ซึ่งจากการทดสอบการใช้งานในแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว ทำการขับรถกอล์ฟไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมบนถนนจริง พบว่า ระบบสามารถเลียนแบบพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวจากมนุษย์ผู้ฝึกสอนที่ขับโดยใช้พวงมาลัยได้จริง ระบบที่ได้รับการฝึกสอนด้วยเครือข่ายประสาทเทียมช่วยให้การควบคุมบังคับเลี้ยวรถไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยวนี้ มีความเหมาะสมกับแยกการเลี้ยวมากกว่าระบบที่ไม่ได้รับการฝึกสอน พร้อมทั้งได้รับความรู้สึกตอบสนองเสมือนการควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยพวงมาลัยจริง ซึ่งสามารถสรุปเนื้อหางานวิจัยวิทยานิพนธ์ตามกระบวนการสำคัญออกเป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. ระบบบังคับเลี้ยว คือ ส่วนงานฮาร์ดแวร์ทางกล ในงานวิจัยนี้ทำการปรับแต่งระบบบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า ให้เป็นแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering: C-EPS)

2. การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) ดำเนินการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมบังคับเลี้ยวโดยใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยวแทนการใช้พวงมาลัย เพื่อใช้ควบคุมทิศทางการเลี้ยวของรถกอล์ฟไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมบนถนนจริง พร้อมทั้งสร้างเสถียรภาพให้กับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว โดยการนำตัวควบคุมแบบพีไอ เข้าไปใช้ในระบบควบคุมบังคับเลี้ยวรถกอล์ฟไฟฟ้า

3. การคัดแยกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว เครื่องมือที่นำมาใช้ในการระบุและคัดแยกกลุ่มของลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว ได้แก่ ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัว (adaptive resonance theory: ART) โดยใช้ค่าเวลาที่เริ่มหักเลี้ยว และค่ามุมเลี้ยวมากสุด เป็นค่าอินพุตของเครือข่าย ART ความละเอียดในการจัดแบ่งกลุ่มขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance) หากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่าน้อย ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะน้อย ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลน้อย แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะกว้าง ในทางตรงข้ามหากเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สอดส่องที่มีค่ามาก ความละเอียดในการแบ่งกลุ่มก็จะสูง ทำให้ได้จำนวนกลุ่มข้อมูลมากขึ้น แต่ช่วงของกลุ่มข้อมูลจะแคบลง และเมื่อส่งข้อมูลกลุ่มใหม่ที่เครือข่ายยังไม่ได้ เรียนรู้ จดจำ และยังไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มใดเลย เข้าไปในเครือข่าย ART แล้วพบว่า เครือข่าย ART สามารถที่จะเรียนรู้กลุ่มข้อมูลกลุ่มใหม่ และสามารถระบุกลุ่มข้อมูลนั้นเพิ่มเติมใหม่ขึ้นมาได้ทันที

4. การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) การทำงานจริง คือ เมื่อผู้ควบคุมทำการบังคับเลี้ยวด้วยอุปกรณ์บังคับเลี้ยว ค่ามุมอ้างอิงนั้นจะถูกส่งเข้าไปที่เครือข่ายประสาทเทียม ที่ได้ทำการฝึกสอนไว้แล้ว เครือข่ายประสาทเทียมจะทำหน้าที่ในการปรับ และชดเชยค่ามุมการเลี้ยวนั้นๆให้ได้ตามลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ได้รับการเรียนรู้มา

5. การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบอัตโนมัติ ทำงานจริง คือ ทำการเลือกรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ต้องการไว้ จากนั้นเครือข่ายจะทำหน้าที่ส่งค่ามุมเลี้ยวที่ได้เรียนรู้ พร้อมทั้งควบคุมบังคับเลี้ยวด้วยตัวเอง แม้ว่าข้อมูลการฝึกสอนเครือข่ายจะไม่ได้มีครบทุกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่เป็นไปได้ แต่เครือข่ายก็ยังสามารถสร้างลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวรูปแบบที่เหลือนั้นขึ้นมาได้ และการควบคุมบังคับเลี้ยวเลียนแบบมนุษย์โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมและวิชวลเซอร์โว โดยการสร้างเครือข่ายเพื่อฝึกสอนระบบโดยใช้ค่าจุดนำทางการเคลื่อนที่ และหาค่ามุมเลี้ยวจากแบบจำลองเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ซึ่งได้จากการประมวลผลข้อมูลภาพ มาเป็นเป็นอินพุท และใช้ค่ามุมเลี้ยวจากมนุษย์เป็นต้นแบบเป้าหมาย ซึ่งช่วยให้การควบคุมบังคับเลี้ยวมีความใกล้เคียงกับมนุษย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- สำหรับการใช้งานบนถนนจริง ต้องระมัดระวัง ความปลอดภัยต้องมาก่อน

- เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ชุดบังคับเลี้ยวแบบช่วยแรงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยขับที่ชุดแกนพวงมาลัย (column type electric power steering: C-EPS) พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) ซึ่งใช้ในรถยนต์ที่ขับด้วยพวงมาลัยแบบปกติทั่วไป เมื่อนำมาสร้างเป็นการควบคุมบังคับเลี้ยวแบบใช้อุปกรณ์บังคับเลี้ยว (ไม่ใช้พวงมาลัย) แล้ว พบว่า ชุดควบคุมมอเตอร์ (EPS-ECU) จะสั่งปิดการทำงานด้วยตัวเอง เมื่อเกิดการหมุนอุปกรณ์บังคับเลี้ยวสลับทิศทางซ้าย-ขวา กลับไป-กลับมาแบบรวดเร็วเกินไป ที่เกินกว่าการใช้มือหมุนพวงมาลัยแบบปกติจะทำได้ ดังนั้นในการใช้งานต้องระวังข้อจำกัดดังกล่าว

- เนื่องจากข้อมูลการฝึกสอน ได้รับจากการมนุษย์ผู้ฝึกสอนขับรถกอล์ฟไฟฟ้าเก็บข้อมูลโดยตรง ดังนั้น ผู้ขับฝึกสอนจึงควรฝึกซ้อมขับรถกอล์ฟไฟฟ้าก่อนการเก็บข้อมูลจริง

- หากนำไปพัฒนาต่อยอด ประโยชน์ของระบบควบคุมบังคับเลี้ยวนี้จะช่วยผู้ที่เคยขับรถยนต์แต่พิการแขนหรือมือข้างใดข้างหนึ่ง ให้สามารถขับรถกอล์ฟไฟฟ้าแบบดังกล่าวได้โดยง่ายด้วยมือเพียงข้างเดียว ซึ่งหากระบบควบคุมบังคับเลี้ยวดังกล่าวถูกนำไปพัฒนาติดตั้งบนรถนำเที่ยวความเร็วต่ำที่วิ่งวนอยู่เฉพาะภายในสถานที่นั้นๆ เช่น รถนำเที่ยวของสวนสัตว์ เป็นต้น ผู้พิการดังกล่าวสามารถประกอบอาชีพขับรถนำเที่ยวดังกล่าวได้ และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานสำหรับการควบคุมบังคับเลี้ยวยานพาหนะแบบระยะไกลได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Srikeaw, A. (2009). “Computational Intelligence”. Suranaree University of Technology. ch.12, 14.: 275-299, 329-341.

Kehtarnavaz, N. Sohn, W. (1991). “Steering Control of Autonomous Vehicles by Neural Networks”. American Control Conference.: 3096 – 3101.

Jae, Ryoo. and Cheol, Lim. (1999). “Neuro-Fuzzy Control System for Vision-Based Autonomous Vehicle”. IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, Seoul, Korea. Aug 22-25. vol.3.: 1643 – 1648.

M. Olsen, Darter. and V. Scott, Gordon. (2005). “Vehicle steering control using modular neural Networks”. Information Reuse and Integration. Conf. IRI - IEEE International Conference. Aug 15-17.: 374 – 379

Huaiquan, Zang. and Min, Liu. (2007). “Fuzzy Neural Network PID Control for Electric Power Steering System”. Automation and Logistics, IEEE International Conference. Aug 18-21. : 643 – 648.

A. Srikaew, P. Kumsawat, K. Attakitmongcol. and T. Somoon. (2012). “Automatic Vision-based Steering Control System using Radial Basis Function Neural Network”. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, Bangkok Thailand. Nov 21-24.: 195-200

Badawy, A., Zuraski, J., Bolourchi, F. and Chandy, A. (1999). "Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System". SAE Technical Paper No.1999-01-0399.

Zeng, Qun. and Huang, Juhua. (2009). “Modeling and Simulation of the Electric Power Steering System”. Circuits, Communications and Systems, PACCS. Pacific-Asia Conference. May 16-17.: 236 – 239.

C. Sotthithaworn, P. Kumsawat, K. Attakitmongcol. and A. Srikaew. (2007). “A Vehicle Tracking System Using PCA and Adaptive Resoance Theory”. Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal. Speech and Image Processing, Beijing China. Sep 15-17.: 50-54.

A. Srikaew, K. Attakitmongcol, P. Kumsawat. and N. Potparinya. (2013). “Automatic Scene Learning and Recognition System using Sensor Fusion”. International Conference on Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology, Zurich Switzerland. July 30-31.: 1756-1762.

Lim. C.M., Ouyang. Y.Z., Ouyang. Y.K., Lee. T.H. (1997). “Adaptive control of electric drives using neural networks”. Power Electronics and Drive Systems, International Conference. May 26-29. vol.1.: 451–454.

A. Muhammad. (2013). “On replacing PID controller with ANN controller for DC motor position control”. International Journal of Research Studies in Computing. April. vol.2.: 21-29.

Seth Hutchinson and Gregory D. Hager and Peter I. Corke. (1996). “A Tutorial on Visual Servo Control”. Robotics and Automation, IEEE Transactions.: 651 – 670.

J.K. Mukherjee. (2004). “Visual Servo Control for Intelligent Guided Vehicle”. ICONIP 2004, LNCS 3316.: 1160-1165.

A. Saetang and A. Srikaew (2006). “Visual Servo Control Using Stereo Image Jacobian”. 8th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation (ACMOS '06)

Hill, J., Park, W.T. (1979). “Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera”. Proceedings of the 9th ISIR.: 233-246.

Weiss, L.E., Sanderson, A.C., Neuman, C.P. (1984). Dynamic Visual Servo Control of Robots: an Adaptive Image-Based Approach. Robotics and Automation. Proceedings. IEEE International Conference.: 662-668.

Willam, H. Crouse. and Donald, L. Anglin. (1993). “Automotive Mechanics”. ch. 50.: 679-683.

สราวุฒิ สุจิตจร (2546). “การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control)” พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

จิระพล ศรีเสริฐผล (2555). “การออกแบบตัวควบคุม (Controller Design)” เอกสารประกอบการสอน. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ประสานพงษ์ หาเรือนชีพ (2557). “งานเครื่องล่างรถยนต์” พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ค่าพารามิเตอร์สอดส่อง (vigilance) ต่างๆ

```
    vigilance: 0.1000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     1     1     1
```

```
    vigilance: 0.5000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     1     1     1
```

```
    vigilance: 0.7500
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     1     1     1
```

```
    vigilance: 0.9000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     1     2     2
```

```
    vigilance: 0.9100
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     1     2     2
```

```
    vigilance: 0.9200
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     2     2     3
```

```
    vigilance: 0.9300
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     2     2     3
```

```
    vigilance: 0.9400
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1

cat =

     1     2     3     4
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ ก.1 ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว
การเลี้ยวซ้ายความเร็ว 3 Km/h

```
    vigilance: 0.1000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     1     1     1     1
```

```
    vigilance: 0.5000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     1     1     1     1
```

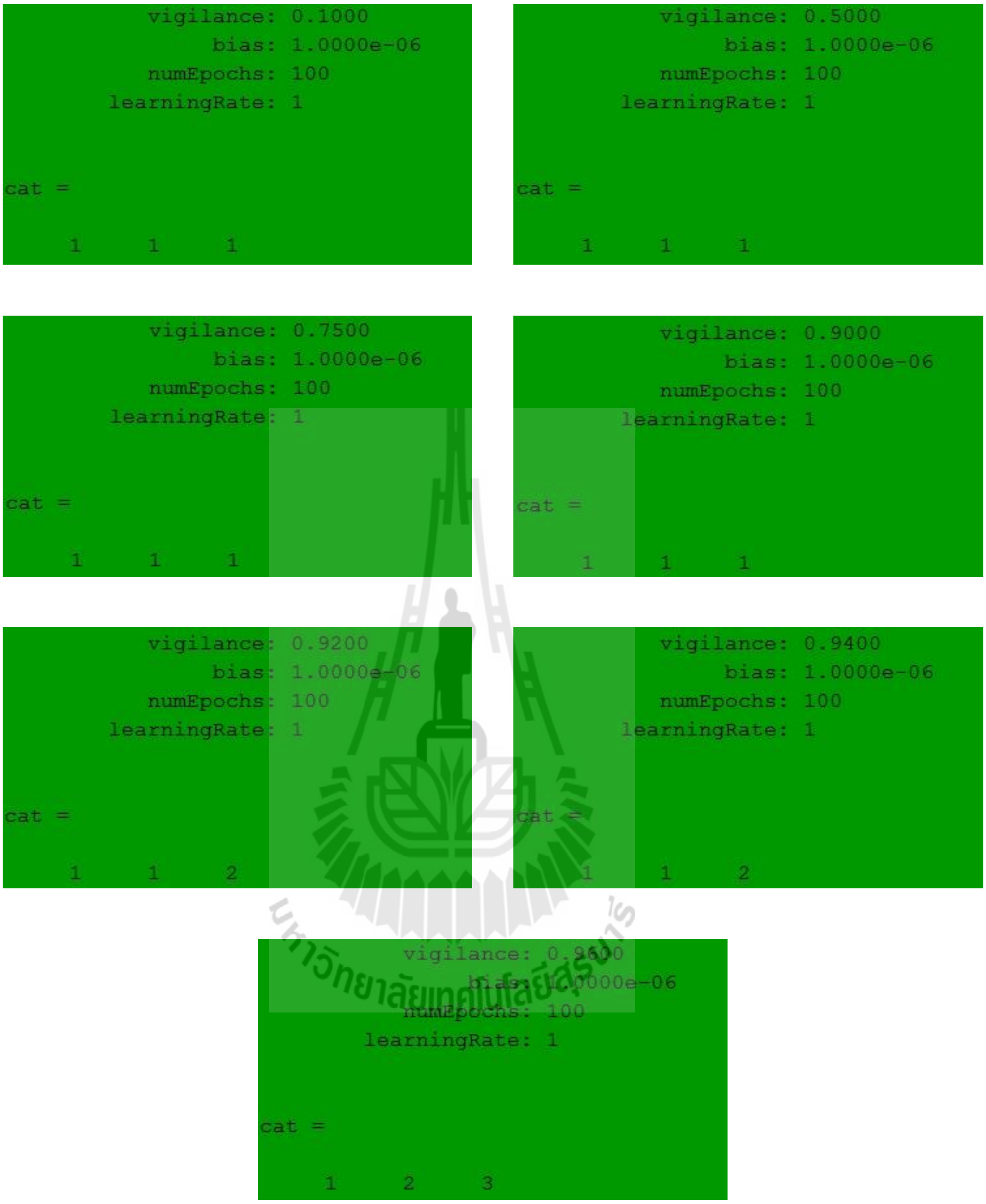
```
    vigilance: 0.7500
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     1     1     1     2
```

```
    vigilance: 0.9000
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     1     2     2     3
```

```
    vigilance: 0.9200
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     1     2     2     3
```

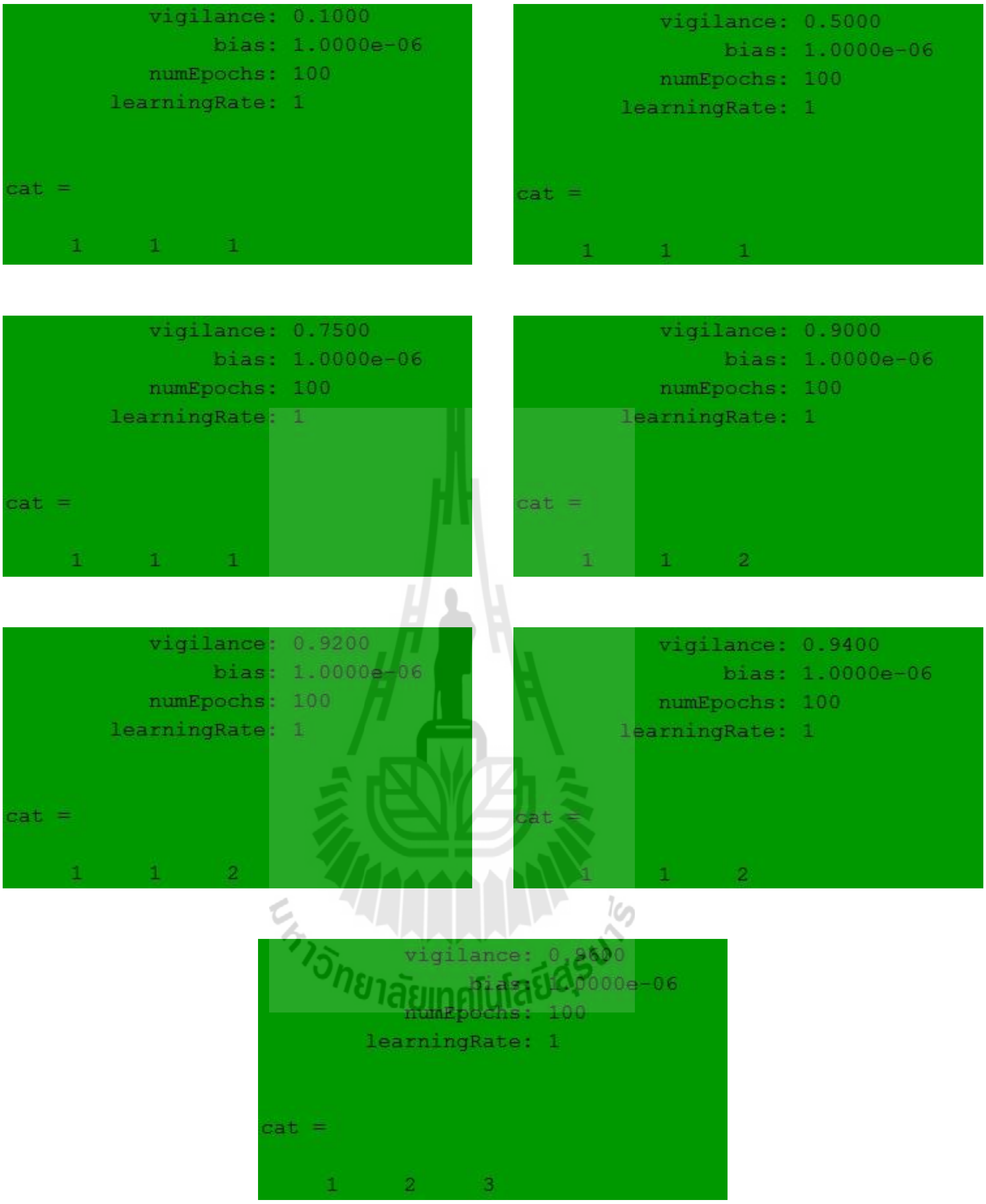
```
    vigilance: 0.9400
         bias: 1.0000e-06
    numEpochs: 100
 learningRate: 1


cat =

     1     2     3     4     5
```

รูปที่ ก.2 ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว
การเลี้ยวขวาความเร็ว 3 Km/h



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ ก.3 ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว
การเลี้ยวซ้ายความเร็ว 7 Km/h

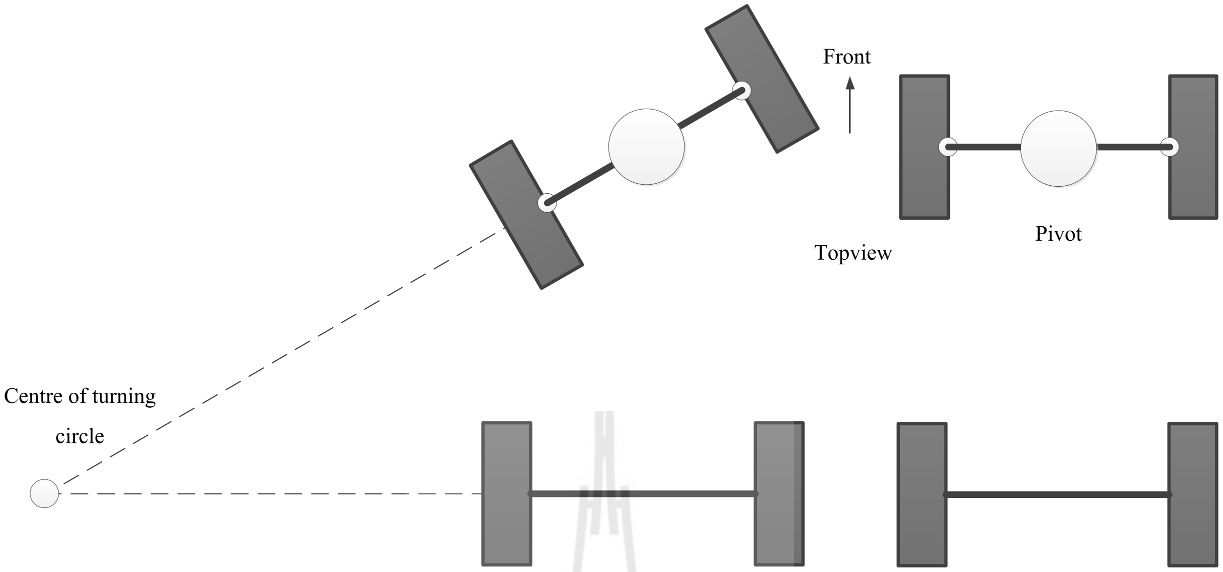


รูปที่ ก.4 ตัวอย่างผลการคัดแยกลักษณะพฤติกรรมการควบคุมบังคับเลี้ยว
การเลี้ยวขวาความเร็ว 7 Km/h

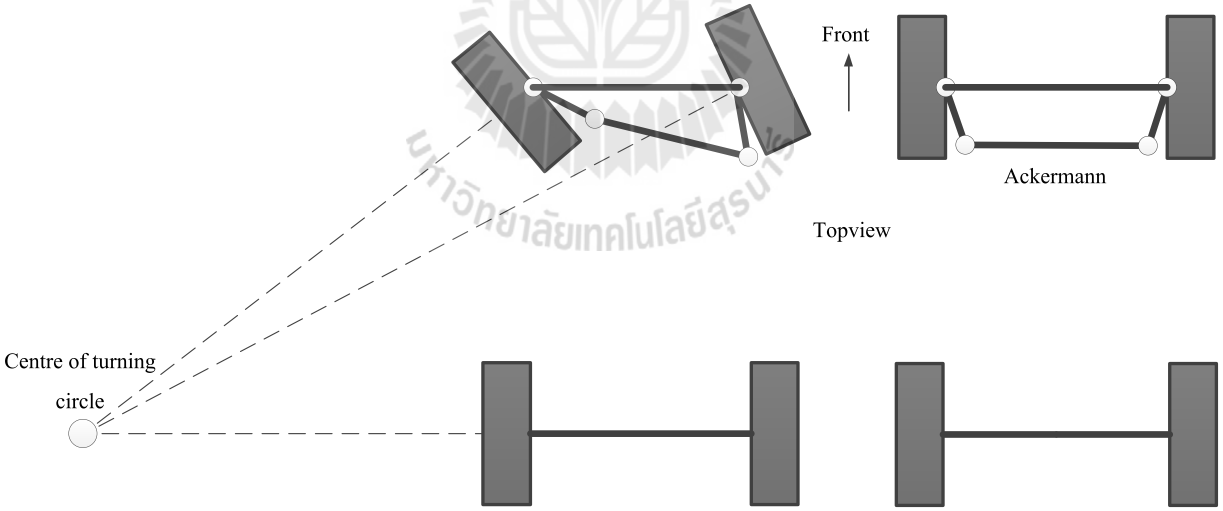
ภาคผนวก ข

ข้อมูลส่วนงานฮาร์ดแวร์ (เพิ่มเติม)

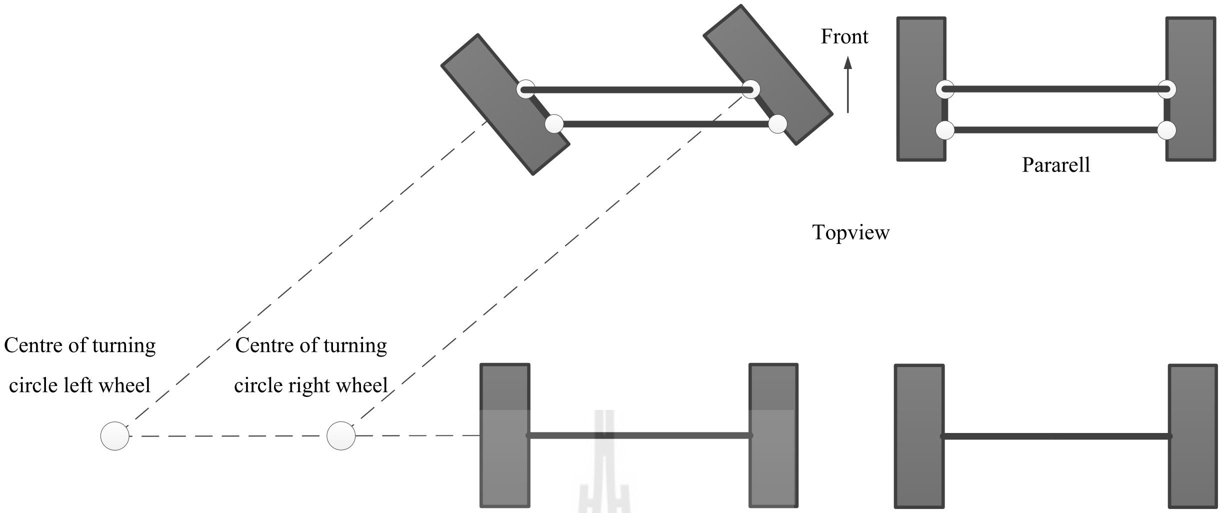
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 โครงสร้างกลไกวิธีบังคับเลี้ยวแบบจุดหมุนตรงกลาง (pivot)

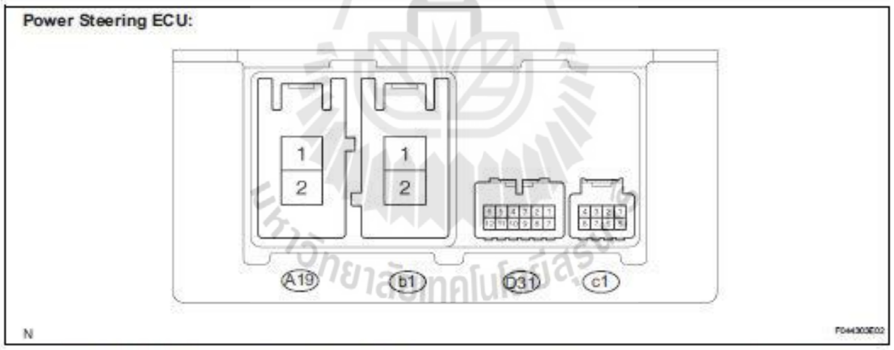


รูปที่ ข.2 โครงสร้างกลไกวิธีบังคับเลี้ยวแบบแอ็กเคอร์แมน (ackermann)



รูปที่ ข.3 โครงสร้างกลไกวิธีบังคับเลี้ยวแบบขนาน (parallel)

ข้อมูลจากคู่มือ (2007-toyota-yaris-repair-manual-27-power-steering)



Symbols (Terminals No.)	Terminal Description	Condition	Specified Condition
PIG (A19-1) - PGND (A19-2)	EPS fuse	Always	11 to 14 V
PGND (A19-2) - Body ground	Body ground	Always	Below 1 Ω
M1 (b1-1) - PGND (A19-2)	Power steering motor	1. With ignition switch on, turn steering wheel to left 2. With ignition switch on, turn steering wheel to right	1. 11 to 14 V 2. Below 1 V
M2 (b1-2) - PGND (A19-2)	Power steering motor	1. With ignition switch on, turn steering wheel to left 2. With ignition switch on, turn steering wheel to right	1. Below 1 V 2. 11 to 14 V
CANH (D31-1) - CANL (D31-7)	CAN BUS	Ignition switch off	108 to 132 Ω
SIL (D31-2) - PGND (A19-2)	DLC3	Communication established by connecting intelligent tester to DLC3	Pulse generation (See waveform 1)
IG (D31-6) - PGND (A19-2)	ECU-IG fuse	Ignition switch on	11 to 14 V
TS (D31-11) - PGND (A19-2)	DLC3	Ignition switch on	11 to 14 V
SPD* (D31-5) - PGND (A19-2)	Speed signal	Ignition switch on	Pulse generation (See waveform 2)
TRQ1 (c1 -5) - PGND (A19-2)	Torque sensor	With ignition switch on, turn steering wheel to left and right	0.3 to 4.7 V
TRQV (c1-6) - PGND (A19-2)	Torque sensor	Ignition switch on	7.5 to 8.5 V
TRQ2 (c1-7) - PGND (A19-2)	Torque sensor	With ignition switch on, turn steering wheel to left and right	0.3 to 4.7 V
TRQG (c1-8) - PGND (A19-2)	Torque sensor	Always	Below 1 Ω

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษา

Arthit Srikaew , Prayoth Kumsawat, Kitti Attakitmongcol and Bannakit Khitthuk., **Human-Learning Steering Control Based-on Artificial Neural Network and Visual Servo**. 2015 International Conference on Computer, Electrical & Electronics Engineering, Phuket Thailand, October 1-3 2015, PP. 78-86

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Human-Learning Steering Control Based-on Artificial Neural Network and Visual Servo

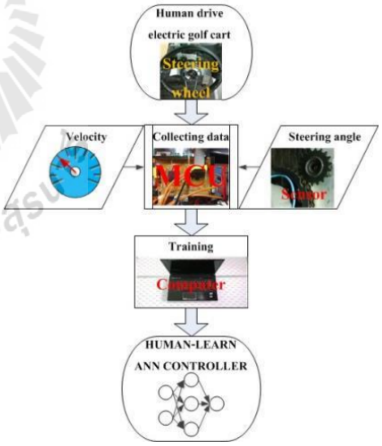
Arthit Srikaew[1], Prayoth Kumsawat[2], Kitti Attakitmongcol[1] and Bannakit Khitthuk[1]

***Abstract*—**This article presented the design and built the prototype system of steering control for real use in vehicles in order to figure out the suitable value for steering control with steering devices and automatic function by using human steering control data as a prototype. The mentioned data are obtained by determining men to drive vehicles using genuine steering wheels and had the system learned, remembered the behavior patterns of steering control from artificial neural network (ANN) technique. And it could sort out their groups with the abrupt awareness, the remembrance of behavior patterns of new steering control which the system had not either learned or remembered before by using adaptive resonance theory technique (ART). The essential information in training included front wheel angle values, vehicle velocity, and concurrent illustration data for automatic steering control. The results of research were the acquisition of steering control prototype which was suitable for turning in accordance with situations resembling human steering control with genuine steering wheel, and the proficiency in selecting behavior patterns of steering control.

***Keywords*—**Artificial Neural Network, Adaptive Control, Human-Learning.

I. Introduction

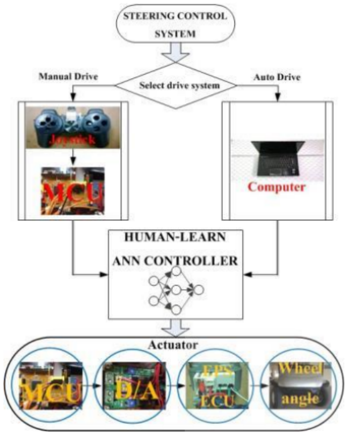
FOR working on authentic routes, the vehicle steering control with the steering device is rather difficult to control vehicles turning to suitable directions. Likewise, the determination to acquire suitable turn angle for vehicles in various situations is not easy for the automatic steering control. Despite the availability of controlling PI device of steering control helping such system achieve the referred goals which stem from steering devices, PI device cannot determine appropriate turn angle value for steering control system. Thus, this research used human steering control to determine suitable turn angle and had artificial neural network learned, and remembered the function of steering control. Many researches have presented steering control system by using artificial neural network (ANN). For example, the use of back-propagation algorithm in automatic steering control system with ANN instead of following flow chart, [1] the search for the model of steering control with Neural-fuzzy technique, [2] the steering control system with artificial neural network (ANN) of modular by coaching the system with the calculation for the lateral position of vehicles in advance, [3] the steering control system of PID-Fuzzy-Neural network (PID-Fuzzy-NN) [4] the search for steering control model with artificial neural network radial basis function for automatic steering control system [5]. The human-learning steering control by using artificial neural network emphasizing the adaptive control for steering control with steering control devices and automatic steering control is to imitate the similar or close to human steering control behavior with steering wheels. In addition, it can be practically used in real circumstances by determining vehicles used on authentic roads. Hardware which was used in this research included an electric golf cart, Electric Power Steering, EPS with a driving motor set, a notebook computer, a micro- controller, and a module converting signals from digital to analog.



(a)

Arthit Srikaew, Kitti Attakitmongcol and Bannakit Khitthuk, are with School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Ave, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

Prayoth Kumsawat, School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Ave, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand



(b)

Fig. 1: (a) Overview diagram of system training, (b) Overview diagram of actual

II. Human-Learning Steering Control Using Artificial Neural Network

Artificial neural network (ANN) is efficient and intelligent science which is popularly applied due to outstanding properties including learning and remembrance.

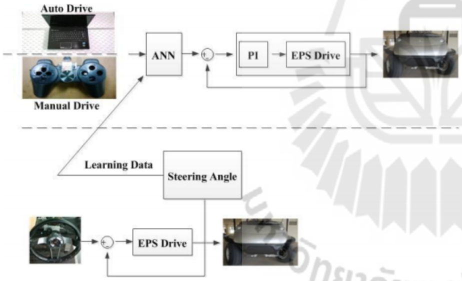


Fig. 2: Diagram of Learning and Actual operation of human-learning steering control with artificial neural network

This research comprised steering control both with automatic function and with steering devices. Both of them used multi-feed forward network architectural structure which was coached by using back-propagation algorithm in learning. The diagram of learning is shown in Figure 2. When considering N layers of network, output of that layer will be input of next layer.

The learning process of using steering control was to determine human to drive vehicles using steering wheel and using control devices on authentic routes according to stipulation including stable vehicle velocity while coaching, the required bends and the junctions to be trained. The data of two turn angle types were collected at those bends and junctions according to the stipulation. Then the data of turn angles were taken to send to ANN system for learning and remembering by choosing required patterns of steering control behaviors with steering wheel as prototypes, while the automatic operation particularly used some parts of steering control behavior with steering wheel and let the network establish potential steering control for directions and velocity.

The actual work operation of using steering device was when the controller controlled steering with steering devices, the value of referred angles would be sent to ANN which has already learned. The ANN would functionally adjust and reimburse that turn angle value to that of previously learned. The work operation is shown in Figure 3. In terms of automatic work operation, it was to choose required steering control behavior patterns and the network would functionally send learned turn angle value and concurrently control steering by itself.

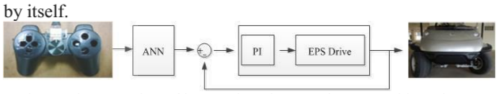


Fig. 3: The operation of human-learning steering control by using artificial neural network (ANN) with steering devices.

A. Segregation of Steering Control Behavior Patterns

For training steering control network with new information, it was crucial to divide the groups of steering control for the perception that the new information had not identical patterns as existing behavior patterns. As individual manual steering control was different owing to his or her aptitude and habit, the identification of behavior patterns and the segregation of steering control behavior were grouped by using adaptive resonance theory: (ART). ART is artificial neural network which possesses a competitive learning type with outstanding property of data segregation. Another exceptional property of ART is plastic status or the ability of response to new data when sending new data group to ART network which has not learned, remembered and grouped at all. ART network is able to learn new data group and additionally identify those data group immediately. The perception of ART network or the adjustment of weight can be operated according to the relation of equation as follows: Equation of Weight Adjustment

$$nw = (l_r * i_p) + ((1 - l_r) * w) \tag{1}$$

Where nw = new Weight value, w = original Weight value, i_p = Input value , l_r = Constant learning

Hypothesis during steering control was when swiftly turning steering wheel with the turn max of turn angle data set having less value than the turn max of front wheels which were in the data set of the start turn with the slower turning, the algorithm was established by using Matlab program, extracting the time of turn start and the most value of turn angle of each turning data set in order to identify steering control behavior patterns.

The scrupulousness of group segregation was determined by vigilance which was in 0-1 range. If the vigilance value is small, the scrupulousness of group segregation will be small. This acquires small data sets but wide range of data. On the other hand, if the vigilance value is high, the scrupulousness of group segregation is high. This

provides more groups of data sets but narrower range of data sets.

III. Human-Learning Steering Control Using Artificial Neural Network and Visual Servo

Steering control using visual servo which was corporately used with ANN in this research was to carry the data obtained from the illustration processing to find out the steering models while the CCD camera which was installed in front of the vehicles without any steering controller [5] to use as the value determining referred turn angle for control system and its input value by determining learning system and remembrance of human to be able to automatically control steering no-driver vehicles correctly and safely in accordance with human-learning steering control. Learning diagram and actual operation shown in Figure 4.

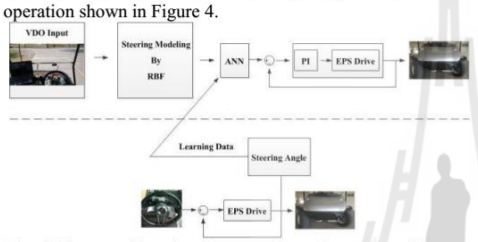
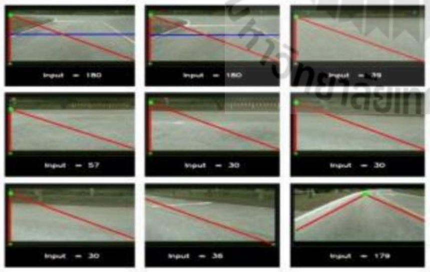
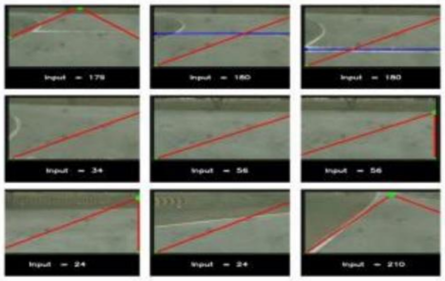


Fig. 4: Diagram of learning diagram and actual operation of Human-learning steering control with artificial neural and visual servo system

This research has taken directing point of movement values and turn angle values from the model of Radius basis function (RBF) to be used as Input for coaching Human-learning steering control network system with Artificial neural network system and Visual servo and referred target value for coaching network obtained by determining human to be steering controller with steering control at turn junction. The results showed the search for directing point of movement values and turn angle values from the model of RBF as shown in Figure 5.



(a)



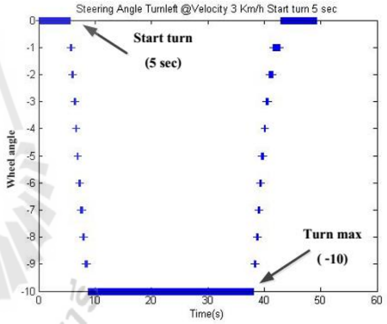
(b)

Fig. 5: Example of directing point of movement values from illustration data: (a) For turnleft, (b) For turnright.

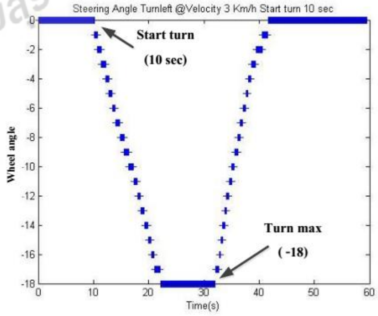
IV. Results of Experiment and Analysis

A. Segregation of steering control behavior patterns

The segregation of steering control behavior patterns from coaching ART network was tested by using two example data sets of steering angle turnleft at velocity 3 Km/h as shown in Figure 6 (a),(b). The network was tested by using the two new additional example data sets in Figure 6 (c), (d).

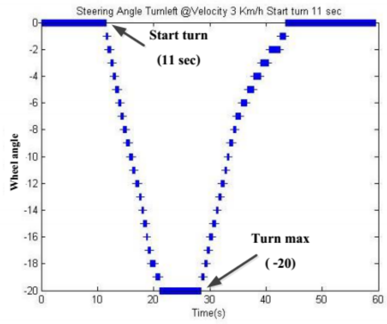


(a)

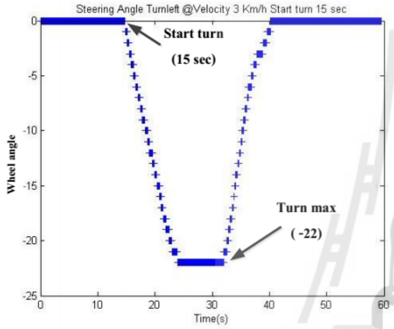


(b)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(c)



(d)

Fig. 6: (a) The 1st coaching data set started turning a steering wheel at the fifth second, (b) The 2nd coaching data set started turning a steering wheel at the tenth second, (c) The 3rd testing data set started turning a steering wheel at the eleventh second, (d) The 4th testing data set started turning a steering wheel at the fifteenth second

According to the results of steering control behavior pattern segregation with steering control from coaching Adaptive resonance theory with two coaching data sets, the network was unable to segregate data sets to be two groups with Vigilance 0.75. Similarly, the network testing the two data sets acquired the same results. In other words, both data sets were put in the first group since Vigilance value in this case was too small. Weight value from network learning was acquired from the relation and presented in Table I (Data test 1).

TABLE I
WEIGHT VALUE DATA SETS

Data test 1	Data test 2		Data test 3		
Weight at vigilance 0.75	Weight at vigilance 0.96		Weight at vigilance 0.96		
0.0500	0.0500	0.1000	0.0500	0.1000	0.1500
0.9000	0.9500	0.9000	0.9500	0.9000	0.8500
0.3200	0.4000	0.3200	0.4000	0.3200	0.2800
0.6000	0.6000	0.6800	0.6000	0.6800	0.7200

At vigilance 0.96, network was able to divide data sets into two groups because the value of vigilance in this study was sufficient to separate steering control behavior patterns with the example coaching data sets. The value of weight from learning network showed weight value from learning network as Table I (Data test 2).

According to the results of steering control behavior pattern segregation with steering control network with Adaptive resonance theory by using new data which network had never learned before. The network could identify as follows;

The 3rd data set started turning steering wheel at the eleventh second. This group was segregated as the 2nd group which was the same group of the second data set.
The2nd group which was the same group as the 2nd data set started turning steering wheel at 10th second. As steering control behavior pattern was close enough, the weight value was still as it was, and the tested data had been already set in the coached group, the new learning did not emerge as shown in Table I (Data test 2).

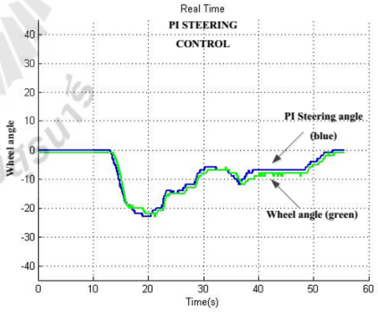
The 4rd data set started turning a steering wheel at the fifteenth second. This group was segregated as the 3rd group which was newly established because the steering control behavior pattern segregation was not sufficiently close to the coached group. This acquired learning (weight adjusting) and concurrently built new data group and weight value from learning new information of network as shown in Table I (Data test 3).

TABLE II
THE TABLE CONCLUDING THE RESULTS OF STEERING CONTROL BEHAVIOR SEGREGATION USING ART

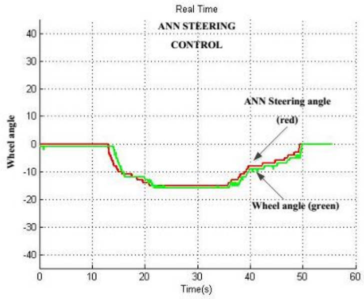
(vigilance)	behaviors in steering control			
	the sample training data set		the sample testing data set	
	The data set no.1	The data set no.2	The data set no.3	The data set no.4
0.75	1	1	1	1
0.96	1	2	2	3

B. Human-Learning Steering Control by Using Artificial Neural Network

- Steering control with steering devices

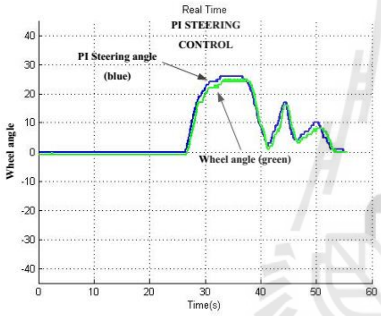


(a)

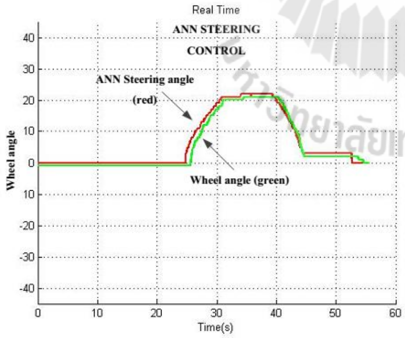


(b)

Fig. 7: Graph presenting steering control turnleft at Velocity 3 Km/h:
(a) Non-use artificial neural network system type,
(b) Use artificial neural system type (Green line graph is actual turn angle) (Blue line graph is turn angle with steering devices) (Red line graph is turn angle with steering devices obtained from artificial neural system)

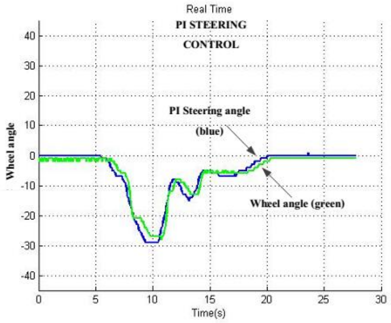


(a)

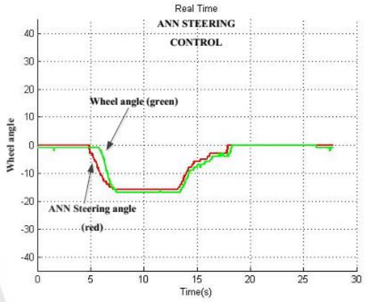


(b)

Fig. 8: Graph presenting steering control turnright at Velocity 3 Km/h: (a) Non-use artificial neural network system type,
(b) Use artificial neural system type (Green line graph is actual turn angle) (Blue line graph is turn angle with steering devices) (Red line graph is turn angle with steering devices obtained from artificial neural system)

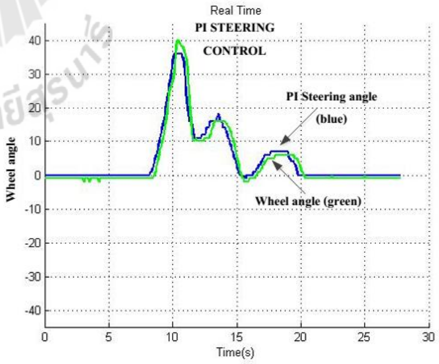


(a)

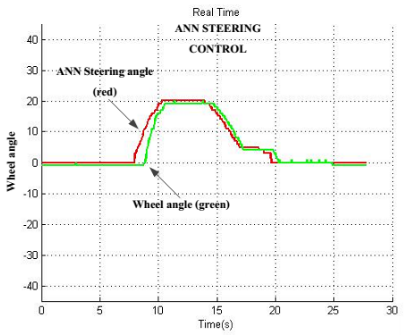


(b)

Fig. 9: Graph presenting steering control turnleft at Velocity 7 Km/h:
(a) Non-use artificial neural network system type,
(b) Use artificial neural system type (Green line graph is actual turn angle) (Blue line graph is turn angle with steering devices) (Red line graph is turn angle with steering devices obtained from artificial neural system)



(a)



(b)

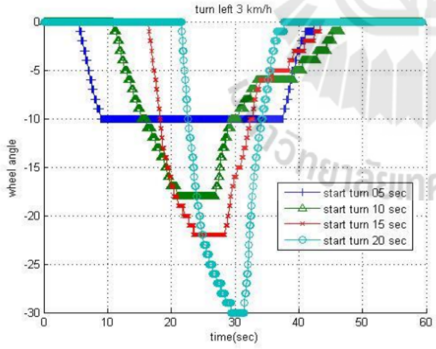
Fig. 10: Graph presenting steering control turnright at Velocity 7 Km/h: (a) Non-use artificial neural network system type, (b) Use artificial neural system type (Green line graph is actual turn angle) (Blue line graph is turn angle with steering devices) (Red line graph is turn angle with steering devices obtained from artificial neural system)

The results of driving vehicles with steering devices before coaching artificial neural network showed that steering control was quite hard and it made the vehicles sway as shown by graph (a) in Figure 7, 8, 9 and 10.

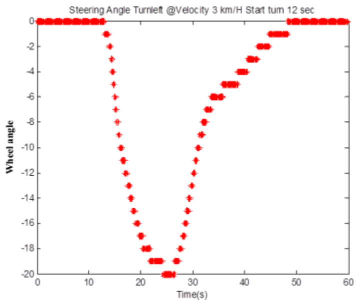
But after coaching steering control with artificial neutral network, it was found that steering control was easily made and obtained the responsive sense close to the use of genuine steering wheel as shown by graph (b) in Figure 7, 8, 9 and 10.

- Automatic steering control

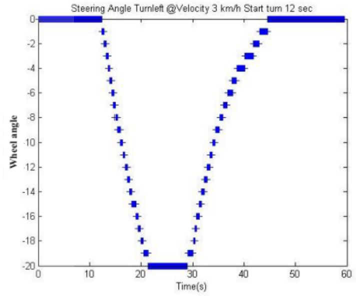
The example patterns of steering control used for coaching were shown in Figure 11 (a).



(a)



(b)



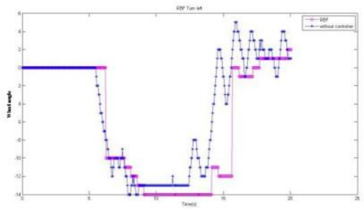
(c)

Fig. 11: (a) The example patterns of coaching steering control turnleft at velocity 3 km/h (the blue data set started turning a steering wheel at 5th second) (the green data set started turning a steering wheel at 10th second) (the red data set started turning a steering wheel at 15th second) (the blue data set started turning a steering wheel at 20th second), (b) Built by using Artificial neural network, (c) The pattern of actual steering control.

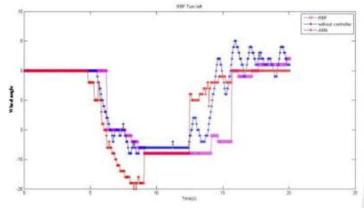
Despite the availability of only four network coaching types, the network was able to newly establish the other patterns left. When taking the example patterns of steering control behavior established by Artificial neural network to compare with the actual pattern of steering control behavior by a steering wheel, it was found that the turn angles had the most equal values at -20 degree and the patterns were similar as shown in Figure 11 (b), (c).

C. Human-Learning Steering Control Using Artificial Neural Network and Visual Servo

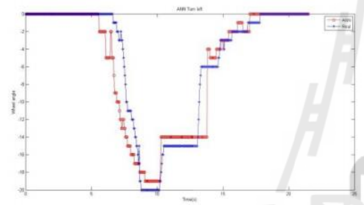
The results of steering control with turn angle value referred from Radial basis function test (Particularly at velocity only 7 Km/h)



(a)

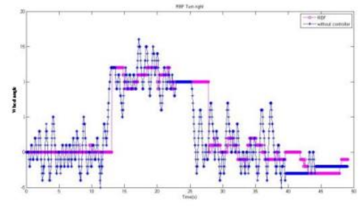


(b)

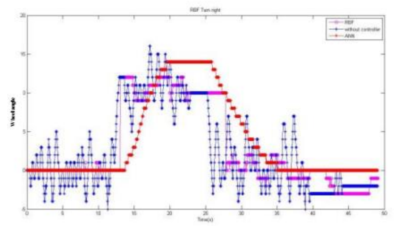


(c)

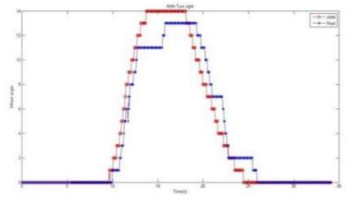
Fig. 12: Turnleft: (a) The results of steering control with steering angle referred from RBF (Pink line graph is the value of steering angle referred from RBF) (Blue line graph is the actual value of turn angle in closed control type),
(b) The results of comparison between turn angle value after network coaching and turn angle referred from RBF)
(Pink line graph is referred turn angle from RBF) (Blue line graph is actual turn angle value in closed control)
(Red line graph is turn angle value after being coached by artificial neural network),
(c) The results of actual steering control compared turn angle value comparing referred turn angle value from RBF
(Red line graph is turn angle value after being coached from artificial neural network)
(Blue line graph is actual turn angle with PI control)



(a)



(b)



(c)

Fig. 13: Turnright: (a) The results of steering control with steering angle referred from RBF (Pink line graph is the value of steering angle referred from RBF) (Blue line graph is the actual value of turn angle in closed control type),
(b) The results of comparison between turn angle value after network coaching and turn angle referred from RBF)
(Pink line graph is referred turn angle from RBF) (Blue line graph is actual turn angle value in closed control)
(Red line graph is turn angle value after being coached by artificial neural network),
(c) The results of actual steering control compared turn angle value comparing referred turn angle value from RBF
(Red line graph is turn angle value after being coached from artificial neural network)
(Blue line graph is actual turn angle with PI control)

From the results of test, it was found that the turn angle value from RBF was quite different at the start turn affecting abruptly turns. Especially, when using closed control type without any controller, it affected more sway.

When coaching artificial neural network to adjust the turn angle value from PBF and concurrently using PI controller, the turn angle value of such turns was close to human steering control with genuine steering wheels.

V. Conclusion

This research article presented the application of artificial neural network and visual servo in learning and remembering human's vehicle steering prototype to control the steering devices and automatic operation. From usability testing by using steering devices to drive vehicles in real conditions on authentic routes, it was found that the system actually imitating human-learning steering control with steering wheel facilitated steering control with steering devices and concurrently got the responses as if it controlled steering with the genuine steering wheels. Furthermore, it was still coached with newly required steering control behavior patterns. If this steering control

system is developed to extend the advantages, it will encourage used-to-drive chauffeurs with a disabled arm or hand can easily drive mentioned vehicles with a single hand. If the mentioned steering control is developed to install in the low speed tour cars which particularly run around the places such as zoo tour cars, the aforementioned handicapped people can do the mentioned career and further develop work operation for vehicle steering control for remote distances.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

[1] Kehtarnavaz, N. Sohn, W., "Steering Control of Autonomous Vehicles by Neural Networks", American Control Conference, pp. 3096 – 3101, 1991

[2] Jae Ryoo and Cheol Lim.,"Neuro-Fuzzy Control System for Vision-Based Autonomous Vehicle", IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, Seoul, Korea, 22-25 Aug, vol.3, pp. 1643 - 1648, 1999

[3] M. Olsen Darter and V. Scott Gordon., "Vehicle steering control using modular neural Networks", Information Reuse and Integration, Conf, IRI - IEEE International Conference, Aug 15-17, pp. 374 – 379, 2005

[4] Huaiquan Zang and Min Liu., "Fuzzy Neural Network PID Control for Electric Power Steering System", Automation and Logistics, IEEE International Conference, Aug 18-21, pp. 643 – 648, 2007

[5] A. Srikaew, P. Kumsawat, K. Attakitmongcol and T. Somoon., "Automatic Vision-based Steering Control System using Radial Basis Function Neural Network", International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, Bangkok Thailand, Nov 21-24, pp. 195-200, 2012

[6] Willam H. Crouse and Donald L. Anglin., Automotive Mechanics, chapter 50, pp. 679-683, 1993

[7] Badawy, A., Zuraski, J., Bolourchi, F., and Chandy, A., "Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System", SAE Technical Paper No.1999-01-0399, 1999

[8] Zeng Qun, and Huang Juhua, "Modeling and Simulation of the Electric Power Steering System", Circuits, Communications and Systems, PACCS. Pacific-Asia Conference, May 16-17, pp. 236 – 239, 2009

[9] A. Srikaew, Computational Intelligence, Suranaree University of Technology, chapter 14, pp. 329-350, 2009

[10] C. Sotthithaworn, P. Kumsawat, K. Attakitmongcol and A. Srikaew, "A Vehicle Tracking System Using PCA and Adaptive Resoance Theory," Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing, Beijing, China, Sep 15-17, pp. 50-54, 2007.

[11] A. Srikaew, K. Attakitmongcol , P. Kumsawat and N. Potparinya, "Automatic Scene Learning and Recognition System using Sensor Fusion," International Conference on Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology, Zurich, Switzerland, July 30-31, pp. 1756-1762, 2013

[12] Lim, C.M. , Ouyang, Y.Z. , Ouyang, Y.K. , Lee, T.H. "Adaptive control of electric drives using neural networks", Power Electronics and Drive Systems, International Conference on, May 26-29, vol.1, pp. 451 - 454, 1997

[13] A. Muhammad, "On replacing PID controller with ANN controller for DC motor position control", International Journal of Research Studies in Computing, April, vol.2, pp.21-29, 2013

ประวัติผู้เขียน

นายบรรณกิจ คิดถูก เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2529 ที่ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ได้รับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหนองบัวคำ ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิมายวิทยา อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 หลังจากจบการศึกษาปริญญาตรีได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะศึกษาได้ให้ความสนใจในศาสตร์ด้านปัญญาประดิษฐ์ การสร้างหุ่นยนต์และระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าร่วมการแข่งขันหุ่นยนต์ดังนี้ TPA Robot Contest Thailand Championship 2006 และ ปี 2007, Robot Design Contest 2008, Thailand Rescue Robot Championship 2008 ขณะศึกษาในระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้ช่วยวิศวกรในโครงการปรับปรุงเครื่องจักรอัตโนมัติในกระบวนการผลิตฮาร์ดิสไดร์ฟ สำหรับ Hitachi GST เฟส 1-2 ในปี 2009-2010 และได้เป็นผู้สอน ผู้ออกแบบการแข่งขันในค่าย NECTEC eCAMP ในปี 2010, 2011 และ 2012