

การพัฒนาระบบจำลองการขับขี่เพื่อศึกษาแรงป้อนกลับที่พวงมาลัย Development of a Driving Simulator for Steering Force Feedback Study

เอกพงศ์ วีระวร, ชยุดม ลิ้มปิผลไพบูลย์, ทศพร เหลืองวิไลย์, ธนพล พุกวิวัฒนะ, นกสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ ศุภวุฒิ จันทร์านูวัฒน์*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6591 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมลล์ supavut.c@chula.ac.th

Eakapong Teeraworn, Chayut Limpipolpibol, Tosaporn Lengvilai, Nuksit Noomwongs, and Supavut Chantranuwathana*
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, 10330, Thailand Tel: 0-2218-6591, Fax 0-2252-2889 *E-mail: supavut.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ:

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ที่มีระบบสร้างแรงป้อนกลับที่พวงมาลัย และ ผลการศึกษาความสำคัญของแรงป้อนกลับจากพื้นถนนที่มีต่อผู้ขับขี่ ระบบสร้างแรงป้อนกลับนี้มีเพื่อให้ระบบสามารถจำลองการส่งผ่านแรงบิดจากพื้นถนนมาถึงผู้ขับขี่ได้ทั้งระบบแบบที่ใช้กับรถทั่วไป และ แบบพาวเวอร์ หรือ แบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้า (drive-by-wire) ระบบจำลองการขับขี่ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยระบบพวงมาลัย, คันเร่ง, และแป้นเบรก เพื่อใช้ในการรับคำสั่งจากผู้ขับขี่ และระบบคอมพิวเตอร์แบบเวลาจริง (Real Time) สำหรับการจำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของรถยนต์ การจำลองใช้แบบจำลองยานพาหนะอย่างง่ายแบบระนาบล้อเดี่ยว (Single-Track Model หรือ Bicycle Model) สถานะของระบบที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์นั้นนำมาใช้ในการสร้างแรงป้อนกลับที่พวงมาลัยโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน การสร้างแรงสามารถสร้างขึ้นตามระบบพวงมาลัยที่ต้องการศึกษา โดยในบทความนี้เราศึกษาระบบพวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับจากพื้นถนนสามระดับคือ พวงมาลัยที่ไม่มีแรงป้อนกลับ (ทำให้ไม่มีความรู้สึกจากพื้นถนน เช่น แบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้าที่ไม่มีแรงป้อนกลับ) พวงมาลัยที่มีการป้อนกลับจากพื้นถนนตามปกติ และพวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับน้อยกว่าปกติ (เช่น ระบบพวงมาลัยพาวเวอร์ หรือแบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้าที่มีการสร้างแรงป้อนกลับ) การทดสอบใช้กับกลุ่มเป้าหมาย 15 ท่าน การทดสอบศึกษาความแม่นยำในการบังคับรถโดยใช้ตำแหน่งรถจากกึ่งกลางถนน และความสบายในการขับขี่จากการใช้แบบสอบถาม ผลลัพธ์ตรงตามที่คาดไว้คือ พบว่าแรงบิดที่ส่งผ่านมาถึงผู้ขับขี่จากพื้นถนนนี้ จะช่วยให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกปลอดภัยและควบคุมได้ดี รวมถึงมีความแม่นยำในการขับขี่อีกด้วย แต่จะทำให้ความสบายลดลงไป แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าพวงมาลัยแบบที่ไม่

มีแรงป้อนกลับไม่ได้ให้ความสบายสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสบายในการขับขี่มีได้มีผลจากแรงที่ใช้ในการบังคับพวงมาลัยเพียงอย่างเดียว

Abstract:

This paper reports a development of a driving simulator system with a force feedback steering wheel. This system was used in a preliminary study about effects of feedback force from the ground to drivers. The system could be used to simulate feedback force from a standard steering system and a power-assisted steering system (such as a power steering or a drive-by-wire system). The system consists of three input devices: a steering wheel, an accelerator, and a brake pedal. The three inputs are used to simulate vehicle dynamics using a computer with a real-time operating system. A simple single-track model was used for simulating a vehicle in this work. The resulting states of the system are used to calculate steering force and generate that force at the steering wheel back to the driver using a brushless electric motor. The force was generated at three levels of feedback force at the steering wheel: a system with no feedback force (such as a steer-by-wire system without force feedback), a system with normal level of feedback (a standard steering system) and a system with lower level of feedback (such as a power-assisted steering system or a drive-by-wire system with force feedback). Fifteen people were used in this study. The study used the vehicle's

positioning error from the middle of the road to represent steering accuracy and used questionnaires to access steering comfort. The results are as expected. The system with more steering feedback gives better steering accuracy but reduces steering comfort. However, it should be noted that the steering system without feedback force did not score first on steering comfort. This indicated that steering comfort does not relate only to the amount of steering force required.

1. บทนำ

การขับรถในปัจจุบันมีระบบช่วยเหลือในการขับที่อยู่มาก เป็นผลให้เกิดความสะดวกสบายและเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ แต่ถึงจะมีระบบช่วยเหลือมากเพียงใด ก็ยังพบเห็นอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนท้องถนนได้บ่อยครั้ง ระบบบังคับเลี้ยวก็เป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อความปลอดภัยในการขับขี่ การออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงการใช้งานร่วมกับผู้ขับขี่ที่มีผลต่อความสามารถในการบังคับรถของผู้ขับขี่ แต่เนื่องจากการคาดเดาการตอบสนองของผู้ขับขี่ต่อระบบบังคับเลี้ยวหรือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผู้ขับขี่นั้นทำได้ยาก และไม่แน่นอน ดังนั้นเพื่อการทดสอบการทำงานของระบบบังคับเลี้ยว และเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเกี่ยวกับผู้ขับขี่ต่อระบบพวงมาลัย ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบจำลองการขับขี่ยานพาหนะเสมือนจริงเพื่อใช้ทดสอบศึกษาการบังคับเลี้ยว

ระบบจำลองการขับขี่ยานพาหนะเสมือนจริงนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการวิจัยและพัฒนาระบบต่างๆ ของรถที่ต้องมีการทดสอบกับผู้ขับขี่จริง การทดสอบระบบกับระบบจำลองการขับขี่ยานพาหนะเสมือนจริงก่อนที่จะทำการทดสอบกับรถจริง นั้นมีข้อดีที่การทดสอบนั้นมีความปลอดภัยสูง, การทดสอบสามารถทำซ้ำที่ข้อกำหนดต่างๆ ได้ง่าย, การวัดสถานะต่างๆ มักทำได้ง่ายกว่าบนรถจริง, และการปรับแต่งระบบมีต้นทุนต่ำกว่า

ปัจจุบันนี้มีความสนใจในการพัฒนาระบบพวงมาลัยแบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้าเพราะระบบแบบนี้มีข้อดีหลายอย่าง การที่ไม่มีแกนพวงมาลัยทำให้การออกแบบภายในรถนั้นง่ายขึ้น และ ปลอดภัยขึ้นเมื่อเกิดอุบัติเหตุ [1],[2] นอกจากนี้ระบบยังสามารถปรับเปลี่ยนการบิดของล้อให้เหมาะสมกับการขับขี่ได้ ทั้งการปรับให้รถมีลักษณะไถ่โค้ง (oversteer) และตื้อโค้ง (understeer) [3] ระบบสามารถทำงานได้เหมือนกับระบบพวงมาลัยแบบแอกทีฟ (active steering) [4] การทำงานของระบบนั้นนั้นมักใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนคันชักที่ใช้บังคับเลี้ยวของล้อ โดยการบังคับมอเตอร์นี้ใช้ข้อมูลตำแหน่งของพวงมาลัยจากอุปกรณ์ตรวจรู้เช่นตัวต้านทานปรับค่าได้ และใช้มอเตอร์อีกตัวที่พวงมาลัยเพื่อจำลองแรงป้อนกลับจากล้อที่หายไปจากการที่ไม่มีกลไกทางกลเชื่อมต่อระหว่างล้อและพวงมาลัยโดยตรง โดยการพัฒนาพวงมาลัยแยกส่วนแบบนี้จะให้ความสนใจในการสร้างแรงป้อนกลับนี้ให้

เหมือนว่ามีกลไกทางกลเชื่อมต่อระหว่างล้อและพวงมาลัยเช่นระบบทั่วไป [5] การศึกษาการส่งแรงป้อนกลับมักเสนอให้แรงป้อนกลับนั้นเป็นสัดส่วนกับมุมบิดของล้อที่ความเร็วคงที่และที่การยึดเกาะถนนคงที่ [6]

ระบบจำลองการขับขี่ที่ยานพาหนะเสมือนจริงที่ผู้เขียนและคณะได้พัฒนาขึ้นนั้น เป็นระบบที่พัฒนาต่อเนื่องจากที่ได้ทำไว้ [7] โดยในงานนี้นั้น ผู้เขียนและคณะเพิ่มระบบจำลองความรู้สึกของพื้นถนนผ่านทางพวงมาลัย ระบบใช้มอเตอร์ในการสร้างแรงป้อนกลับที่พวงมาลัย และใช้ระบบที่สร้างขึ้นนี้ในการศึกษาผลและความสำคัญของแรงป้อนกลับจากพื้นถนนที่มีต่อผู้ขับขี่ ระบบสร้างแรงป้อนกลับนี้สามารถจำลองการส่งผ่านแรงบิดจากพื้นถนนมาถึงผู้ขับขี่ได้ทั้งระบบแบบที่ใช้กับรถทั่วไป และ แบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้า (drive-by-wire)

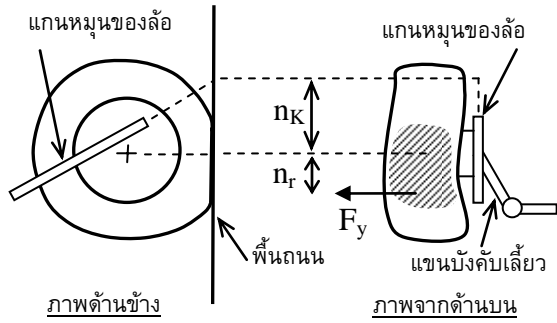
ระบบจำลองการขับขี่ที่สร้างขึ้นแบบจำลองยานพาหนะอย่างง่ายแบบ Single-Track Model หรือที่เรียกว่า Bicycle Model โดยรับสัญญาณการควบคุมจากผู้ขับขี่ มุมสลีปด้านข้างที่ล้อหน้าถูกนำมาคำนวณแรงโมเมนต์ด้านข้างที่ล้อหน้าทั้งสอง โมเมนต์นี้นำมาใช้ในการสร้างแรงป้อนกลับที่พวงมาลัยโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน การสร้างแรงสามารถสร้างขึ้นตามระบบพวงมาลัยที่ต้องการศึกษา โดยในบทความนี้เรากำลังศึกษาระบบพวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับสามระดับคือ พวงมาลัยที่ไม่มีแรงป้อนกลับ (ทำให้ไม่มีความรู้สึกจากพื้นถนน เช่น แบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้าที่ไม่มีแรงป้อนกลับ) พวงมาลัยที่มีการป้อนกลับจากพื้นถนนตามปกติ และ พวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับน้อยกว่าปกติ (เช่น ระบบพวงมาลัยพาวเวอร์ หรือแบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้าที่มีการสร้างแรงป้อนกลับ) ระบบถูกนำมาทดสอบใช้ในการทดลองการขับขี่เพื่อตรวจว่าระบบสามารถทำงานได้ถูกต้องเหมาะสมและ สามารถให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ในด้านนี้ โดยการทดสอบศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนกลับที่พวงมาลัยที่มีต่อความแม่นยำในการบังคับรถ และความสบายในการขับขี่ ความแม่นยำนั้นวัดโดยใช้ตำแหน่งรถจากกึ่งกลางถนน และความสบายในการขับขี่วัดจากแบบสอบถาม

2. ทฤษฎีความรู้สึกถึงพื้นถนน (Road Feeling)

สำหรับระบบพวงมาลัยแบบกลไก แรงป้อนกลับที่พวงมาลัยนั้นเป็นแรงที่ให้ความรู้สึกถึงพื้นถนน แรงนี้เกิดจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นถนนกับล้อของยานพาหนะ แรงจะถูกส่งผ่านกลไกการทำงานของระบบเลี้ยวในรูปของแรงบิด (T) มาสู่ผู้ขับขี่ผ่านทางอุปกรณ์บังคับเลี้ยว (พวงมาลัย) โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ แรงกระทำด้านข้างของล้อ (F_y) แขนของโมเมนต์ดิ่งกลับของแกนล้อ (n_k , mechanical trail) แขนของโมเมนต์ดิ่งกลับของยาง (n_p , pneumatic trail) อัตราทดของระบบพวงมาลัย (i_L) และ อัตราขยายของระบบพวงมาลัยพาวเวอร์ (V_L) (ดังรูปที่ 1) ซึ่งทำให้เขียนสมการได้เป็น [8]

$$T = (n_k + n_p) F_y / (i_L V_L) \quad (1)$$

แรงกระทำด้านข้างของล้อนั้นขึ้นอยู่กับมุมสลิปด้านข้างของล้อ (side slip angle, α) มุมสลิปนี้เป็นมุมระหว่างแนวความเร็วของล้อในแนวระนาบ (ที่จุดศูนย์กลาง) และแนวระนาบของล้อ เนื่องจากล้อนั้นเมื่อหมุนอยู่จะพยายามกลับไปแนวระนาบของล้อ ล้อจะสร้างแรงด้านข้างเพื่อพยายามดันให้แนวความเร็วของล้อ (ที่จุดศูนย์กลาง) และแนวระนาบของล้อนั้นมาให้ตรงกัน แรงนี้สามารถประมาณให้เป็นสัดส่วนตรงกับมุมสลิปด้านข้างในช่วงมุมต่ำกว่า 10 องศา [9]



รูปที่ 1 กลไกการทำงานของระบบเลี้ยว [8]

การประมาณนี้สามารถทำได้ดีสำหรับการขับที่ทั่วไปที่ความเร็วปานกลางถึงสูง ในการเข้าโค้ง ถ้าเข้าโค้งที่ความเร็วสูงและรัศมีความโค้งต่ำก็จะต้องใช้แรงต้านข้างที่ล้นมาก และต้องการแรงน้อยที่ ความเร็วต่ำและรัศมีความโค้งสูง แรงนี้ในแต่ละล้อเมื่อนำมารวมกันจะเป็นสัดส่วนกับความเร่งด้านข้างของรถในการเข้าโค้งที่ความเร็วคงที่ แรงนี้เมื่อส่งผ่านมาที่ผู้ขับทำให้ผู้ขับรับรู้ถึงความเร่งด้านข้างของรถได้ดีขึ้น และทำให้ผู้ขับสามารถปรับความเร็วในการเข้าโค้งได้ดีขึ้น [6]

แขนโมเมนต์ดึงกลับของแกนล้อนั้นเกิดจากมุมแคมเบอร์ของล้อ แขนโมเมนต์นี้ทำให้โมเมนต์ของแรงด้านข้าง F_y ในลักษณะที่พยายามทำให้ล้อกลับมาในแนวตรงเสมอ แขนโมเมนต์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพในการขับ และ ทำให้รถกลับมาวิ่งในแนวตรงเมื่อผู้ขับปล่อยมือจากพวงมาลัย ดังนั้นการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวจะต้องคำนึงถึงการตอบสนองของระบบในช่วงมุมพวงมาลัยน้อยๆ และไม่มีผู้ขับ (on-center analysis) แขนของแรงนี้นั้นในความจริงมีทั้งในแนวระนาบของล้อดังแสดงในรูปที่ 1 และ ในแนวตั้งฉากกับระนาบของล้อ แต่ในแนวนี้มันมีผลน้อยมากเพราะโมเมนต์ที่เกิดจากแนวนี้ของล้อซ้ายและขวาจะหักล้างกัน

แขนโมเมนต์ดึงกลับของยางนั้นเกิดจากการเปลี่ยนรูปของยาง แรงที่ล้อนั้นจะสร้างขึ้นได้จากการเปลี่ยนรูปของยางเท่านั้น เนื่องจากล้อยางนั้นมีการหมุนอยู่ตลอดเวลาทำให้ยางนั้นไม่สามารถคงการเปลี่ยนรูปได้ และจะต้องเริ่มการเปลี่ยนรูปเมื่อเริ่มแตะกับพื้นถนนที่ด้านหน้าของล้อ และจะเปลี่ยนรูปเพื่อสร้างแรงสูงสุดได้ในส่วนหลังล้อ ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นเมื่อรวมแรงจะได้ศูนย์กลางของแรงที่ค่อนข้างมาด้านหลังของล้อ แขนโมเมนต์ดึงกลับนี้ขึ้นกับแรงกดบนล้อ และมุมสลิปด้านข้าง

ของล้อ ในงานนี้ผู้เขียนใช้การประมาณจากกราฟที่ให้ไว้ใน [8] โดยใช้สมการ

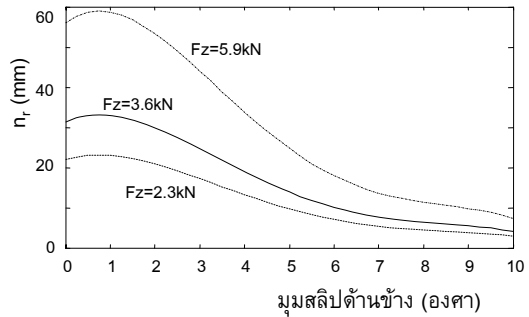
$$n_r = n_{r(3.6)} \times K_{(\text{correction})} \quad (2)$$

โดยที่ $n_{r(3.6)}$ คือค่า n_r ที่แรงกดบนล้อเท่ากับ 3.6 kN ซึ่งเป็นค่าแรงกดของรถจำลองที่ใช้ (static load) และ $K_{(\text{correction})}$ เป็นค่าชดเชยสำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงกด โดยที่

$$n_{r(3.6)} = 0.004|\alpha|^5 - 0.03|\alpha|^4 + 0.56|\alpha|^2 + 4.76|\alpha| + 31.5 \quad (3)$$

$$K_{(\text{correction})} = 0.0008 F_z^3 + 0.0207 F_z^2 + 0.0876 F_z + 0.3763 \quad (4)$$

สมการทั้งสามนี้เมื่อนำมาวาดเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2 สำหรับแรงกดที่ล้อนั้น ในการขับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งจากการเร่งและเบรกรวมทั้งการเข้าโค้ง สำหรับสมการจำลองพลศาสตร์แบบ single-track ที่ใช้นั้นสามารถคำนวณแรงกดที่เปลี่ยนแปลงจากการเร่งและเบรคได้เท่านั้น

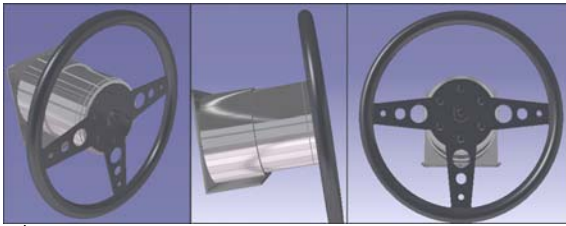


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของแรงกดที่ล้อและมุมสลิปด้านข้างที่มีต่อแขนโมเมนต์ของล้อ

3. ระบบจำลองการขับ

ระบบจำลองการขับที่สร้างขึ้นประกอบด้วยระบบรับคำสั่งจากผู้ขับคือ ระบบพวงมาลัย, คันเร่ง, และแป้นเบรค ระบบพวงมาลัยเป็นแบบป้อนแรงกลับได้ ส่วนคันเร่งและแป้นเบรคนั้นไม่สามารถสร้างแรงป้อนกลับได้ อุปกรณ์หลักของระบบพวงมาลัยคือ มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน ที่สามารถสร้างแรงบิดต่อเนื่องได้ที่ 1 นิวตัน-เมตร ซึ่งค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระบบที่มีโซ่อยู่ในงานวิจัยอื่น บางระบบอาจสร้างแรงบิดได้มากถึง 8 นิวตัน-เมตร [6] โดยที่ค่าสูงสุดในรถทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 4 นิวตัน-เมตร (การขับที่มีมือเดียวควรใช้แรงไม่เกิน 27 นิวตัน [8]) ทั้งนี้แรงที่เกิดขึ้นจริงนั้นมักจะน้อยกว่านี้ในการขับที่ทั่วไป มอเตอร์นั้นใช้ต่อโดยตรงกับพวงมาลัยโดยไม่ใช้การทดเพื่อเพิ่มแรงบิด ข้อดีของการไม่ใช้การทดคือจะทำให้ระบบมีโมเมนต์ความเฉื่อยและแรงเสียดทานน้อย แต่ก็ต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ขึ้น อุปกรณ์วัดมุมที่ใช้เป็นเอนโคเดอร์ (encoder) ที่มีสัญญาณ 2048 ลูกคลื่นต่อรอบก่อน ใช้ quadrature ระบบพวงมาลัยที่มีมอเตอร์และ เอนโคเดอร์ แสดงในรูปที่ 3 เมื่อนำมาประกอบกับระบบจำลองการขับที่มีอยู่ [7] จะได้ระบบ

ดังในรูปที่ 4



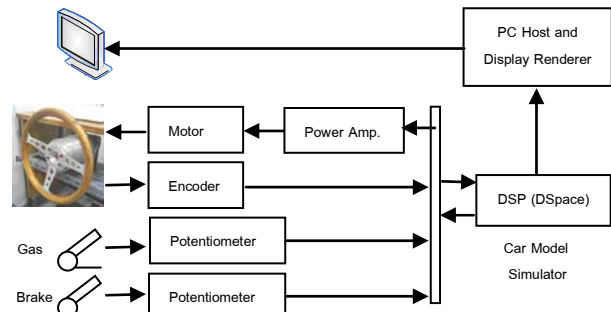
รูปที่ 3 พวงมาลัยพร้อมมอเตอร์สร้างแรงป้อนกลับและอุปกรณ์วัดมุม



รูปที่ 4 ระบบจำลองการขับขี่

ระบบโดยรวมของระบบแสดงดังในรูปที่ 5 การคำนวณการตอบสนองของระบบใช้ DSP (Digital Signal Processor) ของ DSpace® ที่สามารถคำนวณสมการการเคลื่อนที่ของรถ ได้แบบ Real-Time สำหรับการจำลองลักษณะทางพลศาสตร์ของรถยนต์นั้นใช้แบบจำลองยานพาหนะอย่างง่ายแบบ Single-Track Model หรือที่มักเรียกว่า Bicycle Model [7] แบบจำลองแบบนี้เป็นที่นิยมทั่วไปในงานวิจัยเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าแบบแยกส่วนด้วยไฟฟ้า [3][10] โดยอ่านข้อมูลสัญญาณเข้าต่างๆของระบบจากผู้ขับขี่แสดงในรูป นำมาคำนวณสถานะของระบบและใช้ค่ามุมการสลีปด้านข้างของล้อหน้านั้น นำมาคำนวณแรงที่ล้อ จากนั้นคำนวณแรงป้อนกลับที่พวงมาลัยที่ตั้งแสดงในส่วนที่แล้ว การคำนวณใช้การประมาณว่าล้อหน้าทั้งสองข้างนั้น เกิดมุมสลีปเท่ากัน และส่งสัญญาณแรงโมเมนต์ที่พวงมาลัยที่ต้องการให้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมโมเมนต์ของมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ การวาดฉากถนนนั้นใช้คอมพิวเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งจะอ่านสถานะของระบบที่ได้จากระบบ DSpace และนำมาใช้คำนวณตำแหน่งรถยนต์เทียบกับถนนและทิศทาง ค่าตำแหน่งนี้ นำมาใช้ในการวาดรูปทิศทางจำลองเพื่อแสดงบนจอภาพเสมือนผู้ขับขี่เห็นผ่านกระจกหน้าในการขับขี่จริง นอกจากนี้คอมพิวเตอร์ยังใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของรถก่อนส่งให้ระบบ DSpace ใช้งานด้วยการสร้างแรงป้อนกลับนี้สามารถสร้างขึ้นตามระบบพวงมาลัยที่

ต้องการศึกษา โดยในบทความนี้เราศึกษาระบบพวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับสามระดับคือ พวงมาลัยที่ไม่มีแรงป้อนกลับ พวงมาลัยที่มีการป้อนกลับจากพื้นถนนตามปกติ และ พวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับน้อยกว่าปกติ ระบบแรกไม่มีการใช้แรงป้อนกลับ ส่วนสองระบบหลังนั้นใช้แรงป้อนกลับตามในสมการที่ (1) โดยที่ระบบพวงมาลัยแบบธรรมดาที่มีแรงป้อนกลับมากกว่าเมื่อให้ $V_L=1$ ระบบทั้งสองตัดค่าแรงป้อนกลับที่ 0.8 นิวตัน-เมตร เพื่อไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่มอเตอร์ทำได้



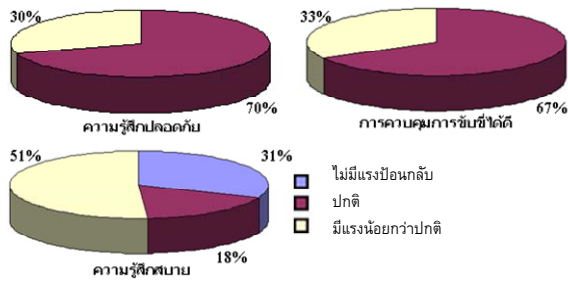
รูปที่ 5 การเชื่อมโยงอุปกรณ์ทั้งหมด

4. การประเมินผลของความรู้สึกถึงพื้นถนน

เพื่อเป็นทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ผู้เขียนใช้ระบบศึกษาผลของแรงป้อนกลับต่อการขับขี่ การศึกษาใช้จากการประเมินผ่านผู้ทดสอบจำนวน 15 คน โดยผู้ขับขี่เป็นนิสิตปี 4 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้ทดสอบทุกท่านทำการทดสอบกับพวงมาลัยที่มีการส่งแรงป้อนกลับทั้งสามแบบ และการทดสอบกับถนน 3 เส้นทาง คือ ถนนทางตรง ถนนทางโค้งรัศมีความโค้ง 100 เมตร และ ถนนที่มีการเลี้ยวขวา (J-turn) รัศมีความโค้ง 20 เมตร ที่ความเร็วคงที่ (เส้นทางตรง และทางโค้งที่ความเร็วคงที่ 60 กม./ชม. และ เส้นทางเลี้ยวขวาที่ความเร็วคงที่ 30 กม./ชม.) ผลจากการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกประเมินผ่านแบบสอบถามภายหลังการขับขี่ และ ส่วนที่สองเป็นการประเมินเชิงตัวเลข

สำหรับส่วนแรกนั้นแบบสอบถามถามถึงความรู้สึกของผู้ขับขี่ ทั้งในด้านความรู้สึกปลอดภัย ความรู้สึกควบคุมการขับขี่ได้ดี และความรู้สึกสะดวกสบาย ผลที่ได้นำมาแสดงในรูปที่ 6 ในรูปที่ 6 นั้นแสดงผลการให้อันดับสูงสุดในทุกคำถามของผู้ขับขี่ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ผู้ขับขี่ส่วนใหญ่ (~70%) นั้นจัดให้ระบบพวงมาลัยที่ให้ความรู้สึกถึงพื้นถนนปกติเป็นอันดับหนึ่งในแง่ของความรู้สึกปลอดภัยและความรู้สึกควบคุมการขับขี่ได้ดี และจะเห็นได้ว่าไม่มีผู้ขับขี่ท่านใดที่ให้อันดับหนึ่งแก่ระบบพวงมาลัยที่ไม่มีความรู้สึกจากพื้นถนนเลย ในด้านความรู้สึกสบายในการขับขี่ จะเห็นว่าระบบพวงมาลัยที่มีแรงป้อนกลับต่ำกว่าปกตินั้นสบายกว่าแบบปกติ แต่สำหรับระบบแบบที่ไม่มีความรู้สึกจากพื้นถนนนั้นเลย ถึงแม้ว่าผู้ขับขี่จะใช้แรงในการขับขี่น้อยที่สุดกลับไม่ได้ให้ความสบายสูงสุด ในส่วนนี้จะนำเสนอแสดงให้เห็นถึงความสบายนั้นไม่ได้มีผลจากแรงที่ใช้เพียงอย่างเดียว และน่าจะรวมถึง

ความยากง่ายในการบังคับรถที่มีผลต่อสมรรถิที่ต้งใช้ในการขับขีด้วย ซึ่งความยากง่ายนี้จะเห็นได้ในส่วนของผลการทดลองเชิงตัวเลขต่อไป



รูปที่ 6 ผลการประเมินความรู้สึกของผู้ขับขี

นอกจากความรู้สึกในการขับขีแล้ว แบบสอบถามที่ยังมีคำถามเกี่ยวกับความรู้สึกในการใช้งานระบบที่สร้างขึ้นด้วยต้งแสดงในตารางที่ 1 จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าระบบที่ได้สร้างขึ้นนั้นน่าจะมีการพัฒนาด้านการแสดงฉากถนนให้กับผู้ขับขี ทั้งนี้ระบบที่สร้างขึ้นใช้จอคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก และการวาดฉากถนนยังเป็นเพียงเส้นร่างที่มีความละเอียดน้อย ทำให้การแสดงผลของหน้าจอแสดงผล(ฉากถนน)ยังไม่สวยงาม

ตารางที่ 1 ผลการประเมินความรู้สึกโดยรวมของเครื่องมือ

	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตำแหน่งการนั่ง	4.00	0.73
ระดับพวงมาลัย	3.67	0.70
ฉากถนน	3.07	0.85
ความเหมาะสมของเส้นทาง	4.07	0.68
ความสมจริงของเครื่องมือ	4.13	0.50

ดีมาก=5, ดี=4, พอใช้=3, แย่=2, แย่มาก=1

ส่วนที่สองนั้นเป็นการประเมินผลการทดลองเชิงตัวเลข การประเมินใช้ค่าระยะของรถจากกึ่งกลางถนน ระยะนี้สามารถถือเป็นระยะความผิดพลาดในการขับขี และสามารถบ่งบอกถึงความแม่นยำในการขับขีได้ ในการทดลองด้วยถนนแต่ละแบบจะสามารถคำนวณค่าตัวแปรได้สามตัวคือ ค่าความผิดพลาดมากที่สุด (เพื่อดูความผิดพลาดมากที่สุดที่เกิดขึ้น) ค่ารากกำลัง 2 เฉลี่ย (เพื่อดูความผิดพลาดโดยรวมตลอดเส้นทาง) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะจากกึ่งกลางถนน (เพื่อดูการแกว่งของการขับขี) โดยตัวแปรดังกล่าวทำให้ค่ายิ่งน้อย ยิ่งแสดงถึงการขับขีที่แม่นยำขึ้น ค่าทั้งสามนี้ใช้ของมูลของผู้ขับขีทั้ง 15 คนรวมเป็นค่าเดียว

ตารางที่ 2 3 และ 4 แสดงผลค่าความเบี่ยงเบนทั้งสามบนถนนทั้งสามแบบ จากตารางที่ 2 และ 3 สำหรับการทดสอบบนถนนตรงและถนนโค้งนั้นจะเห็นว่า พวงมาลัยที่ให้แรงป้อนกลับมาก จะทำให้การขับขีทำได้แม่นยำกว่าแบบที่มีแรงป้อนกลับน้อย ในทำนองเดียวกันการ

ทดสอบการเลี้ยวด้วยมุมที่รัศมีความโค้งน้อย ในตารางที่ 4 นั้นจะเห็นว่าระบบแบบไม่มีแรงป้อนกลับนั้นทำให้เกิดความผิดพลาดสูงสุด แต่ระบบที่มีแรงป้อนกลับทั้งสองให้ค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากเหตุผลสองประการคือ ในการเลี้ยวที่โค้งน้อยนี้อาจต้งใช้แรงในการบังคับเลี้ยวมากขึ้นในเวลาอันสั้นทำให้การควบคุมทำได้ยากขึ้น และทำให้ความแม่นยำลดลงเล็กน้อย และอาจเกิดจากขีดความสามารถของมอเตอร์ แรงป้อนกลับที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมากกว่าที่มอเตอร์จะสร้างได้ จึงอาจทำให้แรงป้อนกลับที่สร้างขึ้นจริงนั้นเท่ากัน จึงทำให้ในบางช่วงพวงมาลัยที่มีความรู้สึกถึงพื้นถนนตามปกติ และ ระบบพวงมาลัยพาวเวอร์นั้นไม่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ผลการประเมินเชิงตัวเลขจากการขับขีบนถนนตรง

ชนิดของพวงมาลัย	Max Error(m)	RMS Error(m)	SD. Error (m)
ไม่มีแรงป้อนกลับ	1.150	0.561	0.380
มีแรงน้อยกว่าปกติ	0.711	0.324	0.234
ปกติ	0.344	0.158	0.113

ตารางที่ 3 ผลการประเมินเชิงตัวเลขจากการขับขีบนถนนโค้ง

ชนิดของพวงมาลัย	Max Error(m)	RMS Error(m)	SD. Error (m)
ไม่มีแรงป้อนกลับ	2.019	0.813	0.751
มีแรงน้อยกว่าปกติ	1.657	0.694	0.652
ปกติ	1.579	0.684	0.578

ตารางที่ 4 ผลการประเมินเชิงตัวเลขจากการขับขีทางเลี้ยวขวา

ชนิดของพวงมาลัย	Max Error(m)	RMS Error(m)	SD. Error (m)
ไม่มีแรงป้อนกลับ	2.36	1.16	0.95
มีแรงน้อยกว่าปกติ	1.47	0.80	0.63
ปกติ	1.51	0.78	0.65

5. ข้อสรุป

บทความนี้เสนอการพัฒนาาระบบจำลองการขับขีเพื่อเพิ่มความรู้สึกถึงพื้นถนนให้แก่ผู้ขับขี ผู้เขียนได้สร้างระบบพวงมาลัยที่สามารถส่งผ่านแรงบิดจากพื้นถนนเสมือนจริงมาถึงผู้ขับขีขึ้น โดยการใช้อุปกรณ์ต่อตรงเข้ากับพวงมาลัยเพื่อใช้จำลองแรงบิดดังกล่าว และเพื่อทดสอบระบบผู้เขียนได้ทำการทดสอบผ่านผู้ทดสอบที่เป็นนิสิต ชั้นปีที่ 4 จำนวน 15 คน เกี่ยวกับความรู้สึกถึงพื้นถนนส่งผลต่อความรู้สึกของผู้ขับขีที่รวมถึงความแม่นยำในการขับขี โดยใช้พวงมาลัยที่มีการส่งความรู้สึกจากพื้นถนน(แรงป้อนกลับ)แตกต่างกันออกไป 3 แบบ พบว่า ในส่วนของความรู้สึกของผู้ขับขี พวงมาลัยที่สามารถส่งผ่านความรู้สึกถึงพื้นถนน จะช่วยให้ผู้ขับขีที่มีความรู้สึกปลอดภัยและควบคุมได้ดี แต่ทำให้ความสบายลดลงไป แต่จะสังเกตได้ว่าพวงมาลัยแบบไม่มีแรงป้อนกลับกลับไม่ได้มีความสบายสูงสุด และการประเมินเชิงตัวเลขพบว่า ความรู้สึกถึงพื้นถนนจะช่วยให้การขับขีที่มีความแม่นยำสูงขึ้นด้วย ระบบจำลองการขับขีที่สร้างขึ้นยังสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้อีกหลายจุด แบบจำลองยานพาหนะที่ใช้เป็นแบบจำลองยานพาหนะอย่าง

ง่ายแบบ single-track model ทำให้ไม่สามารถรวมเอาผลของการถ่ายน้ำหนักซ้ายขวาที่มีต่อแกนโมเมนต์ของล้อยาง และในส่วนของมอเตอร์ที่มีความสามารถส่งแรงบิดได้น้อย ทำให้ไม่สามารถทดสอบจุดที่เหมาะสมของแรงบิดจากพื้นถนนได้อย่างละเอียดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนและคณะขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในการสนับสนุนโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Oh, Se-Wook, Chae, Ho-Chol, Yun, Seok-Chan, and Han, Chang-Soo, "The Design of a Controller for the Steer-by-Wire System," JSME International Journal, Series C, Vol. 47. No.3, 2004, pp. 896-907.
- [2] Tomasini, M., Bolognani, S., "Control Design of a Steer-by-Wire System with High Performance PM Motor Drives," Power Electronics Specialists Conference, 2005, pp. 1839-1844.
- [3] Yih, P., Gerdes, J.C., "Modification of Vehicle Handling Characteristics via Steer-by-Wire," IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 13, No. 6, 2005, pp. 965-976.
- [4] Ackermann, J., Bunte, T., Odenthal, D., "Advantage of Active Steering for Vehicle Dynamics Control," Proc. 32nd International Symposium on Automotive Technology and Automation, 1999.
- [5] Amberkar, S., Bolourchi, F., Demerly, J., Millsap, S., "A Control System Methodology for Steer by Wire Systems," SAE Technical Paper Series, 2004-01-1106.
- [6] Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., "Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis," Vehicle System Dynamics, Vol.45, No.4, 2007, pp. 375-388.
- [7] นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์, ชุตติมา พิชิตพรรณ, วีระชัย สุภัทรวณิช, สัจจะพงษ์ ยงสกุลโรจน์, สาลินี อาชาเมธี, ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์, 2549, "ระบบต้นแบบในการจำลองการขับขี่ยานพาหนะ," การประชุมวิชาการเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, แมนดาริน โกลเด้น วิลเลจ โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549, 8 หน้า
- [8] ฉัตรชัย หงษ์อุเทน. 2539. *กลศาสตร์ยานยนต์ 1*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] Gillespie, T.D., *Fundamental of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineering, 1992
- [10] Im, J., Ozaki, F., Matsunaga, N., Kawaji, S., "Bilateral Control for Steer-by-Wire Vehicles," SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp. 528-533.