ชื่อโครงงาน Force feedback in RC car scale

นายภารุจ เอื้อสุดกิจ

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2568

*** ไม่ต้องพิมพ์สารบัญเอง ***
หากจะพิมพ์เนื้อหาที่มีหัวข้อย่อย ให้ใช้ Heading 1,2,3 ของ Word (set ไว้ให้แล้ว)
เมื่อพิมพ์เสร็จ ให้ไปที่แถบด้านบน References => Update Table สารบัญจะอัพเดทให้เอง
ลองเล่นกับ format ดูก่อนได้ ทำเสร็จแล้วลบกล่องข้อความนี้ทิ้ง

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ **4**

1.1 ที่มา ความสำคัญ **4**

1.2 ประโยคปัญหางานวิจัย (Problem Statement) **4**

1.3 ผลผลิตและผลลัพธ์ (Outputs and Outcomes) **4**

ผลผลิต 4

ผลลัพธ์ 4

1.4 ความต้องการของระบบ (Requirements) **4**

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย (Scopes) **4**

1.6 ข้อกำหนดของงานวิจัย (Assumptions) **5**

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน **5**

บทที่ 2 ทฤษฎี/งานวิจัย/การศึกษาที่เกี่ยวข้อง **6**

2.1 แนวคิดพวงมาลัยเสมือนสำหรับ Force Feedback (Virtual Wheel Concept) **6**

2.1.1 แรงต้านทานแบบพาสซีฟ (Passive Resistive Forces) 6

2.1.2 แรงเชิงรุก (Active Restorative Forces) 6

2.2 สมการพื้นฐานของระบบ Force Feedback **6**

2.3 ระบบ Virtual Vehicle สำหรับ Steer-by-Wire **7**

2.4 การประมาณค่าแรงจากยางและการตรวจจับการลื่นไถล **7**

2.5 การออกแบบระบบ Haptic Feedback สำหรับ Steering **7**

2.6 การประเมินระบบ Steering ด้วย Haptic Feedback **7**

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย **8**

3.1 สถาปัตยกรรมระบบ **8**

3.2 ฮาร์ดแวร์ **8**

3.2.1 รายละเอียดเซนเซอร์ที่ใช้ 8

3.2.2 รายละเอียดรถบังคับวิทยุที่ใช้ 8

3.3 ระบบการสื่อสาร **8**

3.4 อัลกอริทึมการคำนวณแรง Force Feedback **9**

3.4.1 สูตรหลัก (จาก Balachandran et al., 2014) 9

3.4.2 แรงต้านทานแบบพาสซีฟ (Passive Resistive) 9

3.4.3 แรงเชิงรุก (Active Restorative) 10

3.4.1 การประมาณความเร็ว (Velocity Estimation) 10
3.4.1 การตรวจจับการลื่นไถล (Drift Detection) 10

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง/วิจัย ***11***

4.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพ **11**
4.1.1 Latency Test 11
4.1.2 Range Test 11
4.1.3 การทดสอบการทำงานของ Current Sensor (ACS712) 11
4.1.4 การทดสอบเพื่อ Calibrate Loadcell (HX711) 12
4.1.5 การทดสอบองค์ประกอบ FFB (Component Validation) 12
4.1.6 การทดสอบเชิงปริมาณ (Quantitative Test) 13

4.2 ผลการทดลอง **14**
4.2.1 Latency Test Results 14
4.2.2 Range Test Results 15
4.2.3 ผลการทดสอบการทำงานของ Current Sensor (ACS712) 16
4.2.4 ผลการทดสอบเพื่อ Calibrate Load Cell (HX711) 16
4.2.5 ผลการทดสอบองค์ประกอบ FFB (Component Validation) 16
4.2.6 ผลการทดสอบเชิงปริมาณ (Quantitative Test) 17

บทที่ 5 บทสรุป ***18***

5.1[หัวข้อ] **18**
5.1.1 [หัวข้อย่อย] 18

5.2[หัวข้อ] **18**

เอกสารอ้างอิง ***19***

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มา ความสำคัญ

รถบังคับวิทยุ (RC cars) ในปัจจุบันมักใช้ตัวส่งสัญญาณแบบ Pistol-grip ซึ่งขาดการตอบสนองเชิงฟิสิกส์ (Physical feedback) ไปยังผู้ขับขี่ ผู้ขับขี่จึงได้รับเพียงข้อมูลทางสายตา (Visual feedback) ทำให้ขาดความสมจริงและไม่สามารถรับรู้พฤติกรรมของรถในขณะนั้นได้

1.2 ประโยคปัญหางานวิจัย (Problem Statement)

เนื่องจากตัวส่งสัญญาณแบบเดิมไม่สามารถให้ข้อมูลการขับขี่ที่สมจริง จึงจำเป็นต้องพัฒนา "Steering force feedback system" สำหรับรถบังคับวิทยุ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของยานพาหนะให้ผู้ขับขี่รับรู้และสร้างความรู้สึกการบังคับที่สมจริง

1.3 ผลผลิตและผลลัพธ์ (Outputs and Outcomes)

ผลผลิต

1.ระบบ Force Feedback System สำหรับรถบังคับวิทยุที่ทำงานผ่านการเชื่อมต่อไร้สาย

ผลลัพธ์

1.ผู้ขับขี่สามารถรับรู้พฤติกรรมของรถผ่านแรงตอบสนองบนพวงมาลัย ทำให้การควบคุมมีความสมจริงมากขึ้น

1.4 ความต้องการของระบบ (Requirements)

1. สร้างแรงต้าน (Resistive torque) ได้แปรผัน
2. ส่งข้อมูลไร้สายได้ระยะอย่างน้อย 20 เมตร
3. ความหน่วง (Latency) ต่ำกว่า 70 ms
4.ความรู้สึกการตอบสนองเป็นธรรมชาติ

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย (Scopes)

1. ออกแบบระบบ Force feedback แบบจำลองโดยใช้พวงมาลัย Thrustmaster T248

2. ใช้เซนเซอร์วัดกระแส (Current sensor) และ Force sensor เพื่อวัดแรงที่กระทำกับ Servo และใช้ IMU เพื่อประมวลผลระบบควบคุม

1.6 ข้อกำหนดของงานวิจัย (Assumptions)

1. สมมติว่าตำแหน่งพวงมาลัยจากตัวควบคุมตรงกับตำแหน่งล้อหน้า เนื่องจาก Servo มีความเร็วและแรงเพียงพอ

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สัปดาห์ที่ 1-2: กำหนดหัวข้อและขอบเขต
- สัปดาห์ที่ 3-5: ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- สัปดาห์ที่ 6-8: เลือกฮาร์ดแวร์และออกแบบวงจร
- สัปดาห์ที่ 9-11: พัฒนาระบบสื่อสารและอัลกอริทึมควบคุม
- สัปดาห์ที่ 12-13: ประกอบและทดสอบระบบ
- สัปดาห์ที่ 14-15: ทดสอบ ประเมินผล และทำรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2 ทฤษฎี/งานวิจัย/การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาระบบ Force Feedback Steering System จำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพลศาสตร์ของยานพาหนะและเทคนิคการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ โดยสรุปงานวิจัยสำคัญที่สนับสนุนโครงงานได้ดังนี้:

2.1 แนวคิดพวงมาลัยเสมือนสำหรับ Force Feedback (Virtual Wheel Concept)

อ้างอิงจากงานวิจัยของ Balachandran, Erlien, และ Gerdes (2014) จาก Stanford University ที่เสนอ "Virtual Wheel Concept" ซึ่งเป็นกรอบการทำงานสำหรับระบบ Force Feedback ที่แบ่งแรงตอบสนองออกเป็น 2 ประเภทหลักตามคุณสมบัติทางกลไก:

2.1.1 แรงต้านทานแบบพาสซีฟ (Passive Resistive Forces)

เป็นแรงที่เพิ่มน้ำหนักและความหนืดของพวงมาลัยโดยไม่มีพลังงานอิสระในการหมุนพวงมาลัยด้วยตัวเอง ประกอบด้วย:

1. แรงหน่วง (Damping): แรงต้านเชิงวิสคัสที่แปรผันกับความเร็วเชิงมุมของพวงมาลัย
2. แรงเสียดทาน (Friction): แรงต้านคงที่ในกลไกพวงมาลัย
3. ความหนืดกลาง (Centering Stiffness): แรงคืนตัวเข้าสู่ศูนย์ที่แปรผันตามความเร็วรถ

2.1.2 แรงเชิงรุก (Active Restorative Forces)

เป็นแรงที่เกิดจากพลศาสตร์ยานพาหนะซึ่งสามารถหมุนพวงมาลัยได้โดยตรงแม้ผู้ขับขี่ปล่อยมือ:

1. แรงคืนตัวจากยาง (Self-Aligning Torque): แรงที่ยางสร้างขึ้นเพื่อดึงพวงมาลัยกลับสู่ตำแหน่งสมดุล
2. แรงโน้มถ่วง (Gravity Compensation): แรงที่เกิดขึ้นเมื่อรถอยู่บนพื้นผิวเอียง
3. แรงสั่นสะเทือนพื้นผิว (Surface Jolt): แรงกระแทกความถี่สูงจากความขรุขระของถนน

2.2 สมการพื้นฐานของระบบ Force Feedback

จาก Balachandran et al. (2014) สมการหลักของระบบ Force Feedback คือ:

$$\tau_{FFB} = B \cdot \dot{\theta} + T_{fric} \cdot sgn(\theta^{\cdot}) + K_{stiff} \cdot \theta + \tau_{SAT} + \tau_{Gravity} + \tau_{Surface_Jolt}$$

โดยที่:

- τ_{FFB} = แรงบิดรวมที่ส่งไปยังพวงมาลัย
- B = สัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping coefficient)
- $\dot{\theta}$ = ความเร็วเชิงมุมของพวงมาลัย (rad/s)
- T_{fric} = แรงเสียดทานคงที่
- K_{stiff} = ค่าความแข็งของสปริงคืนตัว

- θ = มุมเลี้ยวของพวงมาลัย (rad)
- τ_{SAT} = แรงคืนตัวจากยาง (Self-Aligning Torque)
- $\tau_{Gravity}$ = แรงชดเชยความโน้มถ่วง
- $\tau_{Surface_Jolt}$ = แรงสั่นสะเทือนจากพื้นผิว

2.3 ระบบ Virtual Vehicle สำหรับ Steer-by-Wire

Mehdizadeh และ Kabganian (2011) เสนอสถาปัตยกรรม "Virtual Vehicle" ซึ่งใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะจริงในการคำนวณแรง Feedback โดยแยกระบบพวงมาลัยออกจากระบบหลามล้อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม

2.4 การประมาณค่าแรงจากยางและการตรวจจับการลื่นไถล

จาก IEEE 9568828 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบ Teleoperated ที่ใช้ Slip Angle Estimation สำหรับ Force Feedback ซึ่งใช้ข้อมูลจาก IMU ในการประมาณแรงที่กระทำต่อยางและตรวจจับสถานะการลื่นไถล

2.5 การออกแบบระบบ Haptic Feedback สำหรับ Steering

Katzourakis, Abbink, และ Happee (2010) นำเสนอการออกแบบระบบ Force Feedback สำหรับการทดลอง Human-Machine Interface โดยใช้โมเดลทางกายภาพในการคำนวณแรงบิดที่เหมาะสม

2.6 การประเมินระบบ Steering ด้วย Haptic Feedback

Wang, Wang, และ Wagner (2018) เสนอวิธีการประเมินอุปกรณ์บังคับพวงมาลัยที่มี Haptic Feedback สำหรับยานพาหนะกึ่ง-อัตโนมัติและอัตโนมัติ โดยใช้ทั้งการวัดเชิงปริมาณและการประเมินจากผู้ใช้

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 สถาปัตยกรรมระบบ

ระบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก:

1. ESP32-C6 ทำหน้าที่เป็นหน่วยรับ-ส่งข้อมูลเซนเซอร์และควบคุม Servo/ESC
2. PC (pc_wheel.py) ทำหน้าที่คำนวณอัลกอริทึม FFB และส่งคำสั่งไปยังรถ
3. เซนเซอร์ (IMU, Load Cell, Current Sensor) สำหรับวัดสถานะรถ

3.2 ฮาร์ดแวร์

3.2.1 รายละเอียดเซนเซอร์ที่ใช้

อุปกรณ์	ขา GPIO	หน้าที่
Current Sensor (ACS712)	GPIO 4	วัดกระแสไฟฟ้าของ Servo
IMU (BNO086 V2)	I2C (0x4A)	วัดความเร่งและอัตราการหมุน
Load Cell (HX711)	GPIO 5, 18	วัดแรงต้านในระบบบังคับเลี้ยว

3.2.2 รายละเอียดรถบังคับวิทยุที่ใช้

รายการ	รายละเอียด
Chassis	1/10 Scale Chassis
Drivetrain	All-Wheel Drive
Motor	Rocket RC BLDC 10.5T
ESC	Rocket RC 130A
Servo	9IMod 20 kg servo
Battery	2S LiPo 5200mAh

3.3 ระบบการสื่อสาร

ระบบใช้ WiFi Access Point โดย ESP32-C6 ทำหน้าที่เป็น Access Point ชื่อ "ESP32-RC-CAR" และใช้โปรโตคอล UDP พอร์ต 4210 สำหรับการสื่อสารแบบ Low-latency

รูปแบบข้อมูล:

- PC ⟶ ESP32: S{steering 0-180} T{throttle -100 to 100}

- ESP32 ⟶ PC: A{accX},{accY},{accZ}G{gyroX},{gyroY},{gyroZ}L{loadCell}

3.4 อัลกอริทึมการคำนวณแรง Force Feedback

3.4.1 สูตรหลัก (จาก Balachandran et al., 2014)

จากแนวคิด Virtual Wheel Concept สมการแรงบิดรวมคือ:

$$\tau_{FFB} = \tau_{Passive_Resistive} + \tau_{Active_Restorative}$$

3.4.2 แรงต้านทานแบบพาสซีฟ (Passive Resistive)

$$\tau_{Passive_Resistive} = B \cdot \dot{\theta} + T_{fric} \cdot sgn(\dot{\theta}) + K_{stiff} \cdot \theta + \tau_{LoadCell}$$

พารามิเตอร์	แหล่งข้อมูล	คำอธิบาย
$B \cdot \dot{\theta}$	Thrustmaster T248 Encoder	แรงหน่วงเชิงวิสคัส ($B = 500$) แปรผันตามความเร็วเชิงมุมพวงมาลัย
$T_{fric} \cdot sgn(\dot{\theta})$	Thrustmaster T248 Encoder	แรงเสียดทานคงที่ ($T_{fric} = 2000 \times (1 - v_s)$) โดย v_s คือค่า Speed Factor ที่แปรผันจาก Velocity estimate
$K_{stiff} \cdot \theta$	Thrustmaster T248 Encoder + Velocity Estimate(IMU)	ความหนืดกลาง ($K_{stiff} = 2000 + v_s \times 8000$) ที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรถ
$\tau_{LoadCell}$	Loadcell	แรงต้านจากกลไกการบังคับเลี้ยว

การเพิ่ม Load Cell (Empirical Extension) จากงานวิจัยของ Karimi & Mann (2009) เรื่อง "Torque feedback on the steering wheel of agricultural vehicles" พบว่าแรงต้านในระบบบังคับเลี้ยว (Steering system resistance) มีผลต่อความรู้สึกของผู้ขับขี่ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าแรงต้านจากกลไกการบังคับเลี้ยวเป็นส่วนหนึ่งของ "road feel" ที่ช่วยให้ผู้ขับขี่รับรู้สถานะของยานพาหนะได้ดีขึ้น

ดังนั้นในการทดลองนี้ ระบบได้เพิ่ม Load Cell เพื่อวัดแรงต้านจริงในระบบบังคับเลี้ยว โดยเพิ่มพจน์ Load Resistance เข้ากับสมการ:

$$\tau_{LoadCell} = K_{Load} \cdot |L|$$

โดยที่ $K_{load} = 5$ N·m/kg และ $|L|$ คือค่าสัมบูรณ์จาก Load Cell (grams) ค่า K_{load} นี้ได้มาจากการสอบเทียบ (Calibration) เพื่อให้แรงต้านจาก Load Cell มีขนาดใกล้เคียงกับแรงเสียดทาน (Friction) เมื่อรถอยู่นิ่ง

หมายเหตุ: พจน์ $\tau_{LoadCell}$ เป็นการขยายเชิงประจักษ์ (Empirical extension) ที่ไม่ได้อยู่ในสมการต้นฉบับของ Balachandran et al. (2014) แต่ได้รับแรงบันดาลใจจากการสังเกตของ Karimi & Mann (2009) ที่ว่าแรงต้านในระบบบังคับเลี้ยวมีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้ขับขี่

3.4.3 แรงเชิงรุก (Active Restorative)

$$\tau_{Active_Restorative} = \tau_{SAT} + \tau_{Gravity} + \tau_{Surface_Jolt}$$

$$\tau_{Active_Restorative} = K_{center} \cdot \theta + a_x \cdot G_x + a_z \cdot G_{z_accel}$$

พารามิเตอร์	**แหล่งข้อมูล**	**คำอธิบาย**
$K_{center} \cdot \theta$	Thrustmaster T248 Encoder + Velocity Estimate	แรงคืนตัวเข้าศูนย์ ($K_{center} = 2000 + speed_factor \times 8000$)
$a_x \cdot G_x$	BNO086 (accX)	แรงชดเชยความเอียงจากแรงโน้มถ่วง
$a_z \cdot G_{z_accel}$	BNO086 (accZ)	แรงสั่นสะเทือนจากพื้นผิว

3.4.1 การประมาณความเร็ว (Velocity Estimation)

เนื่องจากไม่มีEncoder ที่ล้อ ความเร็วของรถจึงถูกประมาณจากการรวมค่าความเร่งในแนวแกน X จาก IMU(BNO086) ด้วย Exponential decay:

$$\hat{v} = 0.99 \cdot \hat{v}_{prev} + 0.01 \cdot a_x$$

โดยค่าน้ำหนัก 0.99 และ 0.01 ทำให้ความเร็ว estimate มีการเปลี่ยนแปลงช้า (Low-pass filter effect) ป้องกันสัญญาณรบกวน

3.4.1 การตรวจจับการลื่นไถล (Drift Detection)

ตามวิธีการของ IEEE 9568828 ระบบตรวจจับการลื่นไถลโดยเปรียบเทียบความเร่งทางข้าง (accY) กับค่า Threshold ที่ปรับตามความเร็ว:

$$\text{if } |a_y| > \gamma \cdot (1 + |\hat{v}|) \text{ then } \tau_{Active_Restorative} \leftarrow 0.2 \cdot \tau_{Active_Restorative}$$

โดยที่ $\gamma = 3.0$ m/s² คือค่า Threshold พื้นฐาน เมื่อตรวจพบ Drift ระบบจะลด Active torque ลง 80% ทันทีเพื่อให้ผู้ขับขี่รับรู้ถึงการสูญเสียการยึดเกาะ

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง/วิจัย

4.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพ

เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพของระบบเป็นไปอย่างครอบคลุม จึงได้กำหนดวิธีการทดสอบดังนี้:

4.1.1 Latency Test

วิธีการทดสอบอ้างอิงจาก IEEE 9568828 โดยใช้สคริปต์ Python วัดค่า Round Trip Time (RTT) ผ่านโปรโตคอล UDP

ขั้นตอน:

1. เปิด ESP32-C6 และรอให้ Access Point พร้อม
2. เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ WiFi เข้ากับ ESP32-RC-CAR
3. รัน python test_client.py (สคริปต์จะส่ง 100 แพ็กเกจอัตโนมัติ)
4. บันทึกผลลงไฟล์ CSV

เกณฑ์ผ่าน: ค่าเฉลี่ย Latency < 70 ms, Packet loss < 1%

4.1.2 Range Test

ทดสอบความเสถียรของสัญญาณ WiFi ที่ระยะ 10-40 เมตร

ขั้นตอน:

1. วางรถที่จุดเริ่มต้น เปิดเครื่อง
2. เชื่อมต่อ WiFi และรัน test_client.py
3. ขยับระยะทาง: 5ม., 10ม., 15ม., 20ม., 25ม., 30ม., 40ม., 50ม.
4. บันทึกค่า Latency และ Packet Loss ที่แต่ละระยะ

เกณฑ์ผ่าน: ระยะ 20 เมตรขึ้นไป โดย Latency < 70 ms และ Packet loss < 5%

4.1.3 การทดสอบการทำงานของ Current Sensor (ACS712)

ทดสอบการทำงานเบื้องต้นของ ACS712 5A ในการวัดกระแสของ Servo

ขั้นตอน:

1. เปิดระบบ จ่ายไฟ Servo
2. สังเกตค่ากระแสจาก Serial Monitor ขณะ Servo หมุน
3. ตรวจสอบว่าค่ากระแสเปลี่ยนแปลงเมื่อ Servo ทำงาน

เกณฑ์ผ่าน: ACS712 อ่านค่าได้และค่าเปลี่ยนแปลงตามการทำงานของ Servo

4.1.4 การทดสอบเพื่อ Calibrate Loadcell (HX711)

ทดสอบและสอบเทียบค่าจาก HX711 Load Cell โดยจำกัดน้ำหนักสูงสุดที่ 500g เพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นส่วน RC

ขั้นตอน:

1. ติดตั้ง Load Cell ที่ตำแหน่ง Steering Linkage
2. วัดค่าเมื่อไม่มีแรงกด (Zero/Tare)
3. ตั้งรถในท่าตั้งฉาก (Sideways) วางน้ำหนัก 100g, 200g, 300g, 400g, 500g บนพวงมาลัย (ซ้าย/ขวา) บันทึกค่า L
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงกับค่าที่วัดได้ เพื่อคำนวณ Scale Factor ใหม่

เกณฑ์ผ่าน: ค่า L ที่วัดได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับน้ำหนักที่รู้จัก และ Scale Factor มีความแม่นยำไม่เกิน ±10%

4.1.5 การทดสอบองค์ประกอบ FFB (Component Validation)

ทดสอบการทำงานของแต่ละส่วนประกอบตามวิธีการของ Wang et al. (2018) และ Shakeri et al. (2016)

4.1.5.1 ทดสอบแรงคืนตัว (Steering Stiffness / Self-Centering)

ขั้นตอน:

1. หมุนพวงมาลัยจาก 0° ไป 90° (ซ้าย) และ -90° (ขวา) ค้างไว้ 2 วินาที
2. บันทึก FFB ที่มุมต่างๆ ขณะความเร็วคงที่
3. ปล่อยพวงมาลัย สังเกตการคืนตัว

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ Steering Angle vs FFB แสดงแนวโน้มเชิงเส้น (FFB $\propto |\theta|$)

4.1.5.2 ทดสอบแรงหน่วง (Damping)

ขั้นตอน:

1. หมุนพวงมาลัยช้า (~45°/วินาที) บันทึก FFB
2. หมุนพวงมาลัยเร็ว (~180°/วินาที) บันทึก FFB
3. เปรียบเทียบแรงต้านที่ความเร็วต่างกัน

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ Steering Velocity vs FFB แสดงแนวโน้มเชิงบวก (FFB $\propto |\dot{\theta}|$) ยิ่งเร็วยิ่งมีแรงต้านมาก

4.1.5.3 ทดสอบแรงเสียดทาน (Friction)

ขั้นตอน:

1. หมุนพวงมาลัยช้าๆ จากตำแหน่งตรงกลาง
2. บันทึก FFB ตลอดจากเริ่มต้นจนถึงความเร็วคงที่

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ Time vs FFB แสดง Peak force ที่จุดเริ่มหมุน (Breakaway) แล้วลดลงอยู่คงที่

4.1.5.4 ทดสอบการทำงานของ Load Cell (Steering Resistance Measurement)

ขั้นตอน:

1. ดูค่า L (Load cell) จาก Telemetry ขณะเป็นศูนย์
2. หมุนพวงมาลัยไปที่มุมต่างๆ บันทึกค่า L

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ Steering Angle vs Load Cell แสดงแนวโน้มเชิงเส้น — ค่า |L| เพิ่มขึ้นตาม |θ| และ L มีเครื่องหมายตามทิศทาง

4.1.5.5 ทดสอบการตรวจจับ Drift

ขั้นตอน:

1. ขับรถเป็นเส้นตรง บันทึก FFB และ accY
2. หมุนพวงมาลัยกะทันหัน (จำลอง Drift) บันทึก FFB ขณะ accY สูง

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ accY vs FFB แสดงว่าเมื่อ |accY| เกิน Threshold แรง FFB ลดลง ~80%

4.1.5.6 ทดสอบแรงสั่นสะเทือนพื้นผิว (Surface Jolt)

ขั้นตอน:

1. ขับรถเป็นเส้นตรง บันทึก FFB และ accY
2. หมุนพวงมาลัยกะทันหัน (จำลอง Drift) บันทึก FFB ขณะ accY สูง

เกณฑ์ผ่าน: กราฟ |accZ| vs Surface Jolt แสดงแนวโน้มเชิงบวก (Jolt $\propto$ |accZ|) ยิ่งเขย่าแรงยิ่งมี FFB มาก

4.1.6 การทดสอบเชิงปริมาณ (Quantitative Test)

บันทึกข้อมูล Telemetry ระหว่างการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์:

วิธีที่ 1: ยกรถ (Wheels-Free Simulation)

1. ยกรถขึ้นให้ล้อหมุนอิสระ
2. ปรับ Throttle เพื่อเพิ่มความเร็วที่ประมาณจาก accX integration
3. หมุนพวงมาลัยที่ความเร็วต่างๆ (ช้า/กลาง/เร็ว)
4. บันทึก FFB และ Telemetry

วิธีที่ 2: ขับรถในพื้นที่จำกัด

1. ขับรถในห้อง/ทางเดิน
2. บันทึก FFB และ Telemetry ขณะเลี้ยวกลับไปมา

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 Latency Test Results

จากการทดสอบความหน่วง (Latency Test) จำนวน 100 แพ็กเกจ ผลการทดลองเป็นดังนี้:

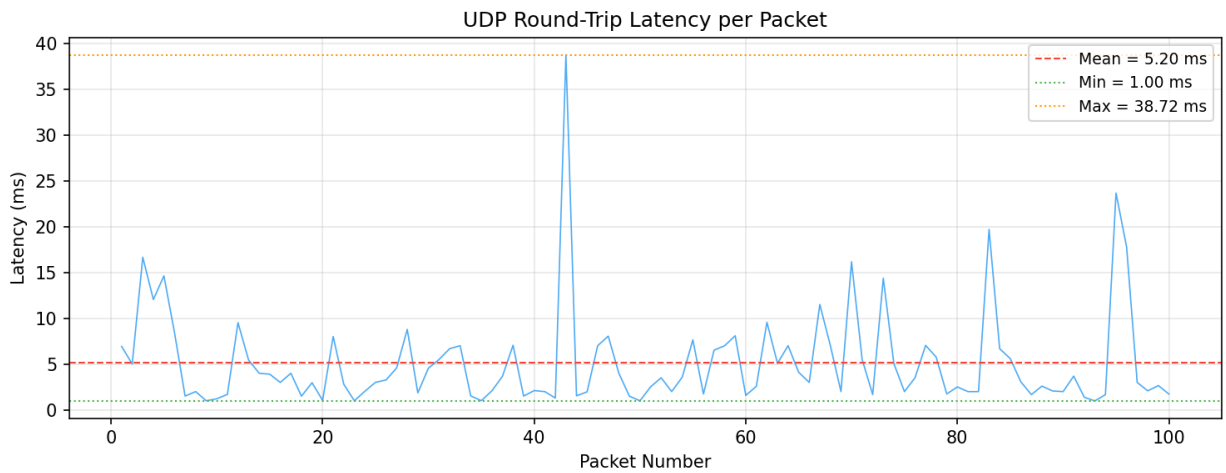


Figure 1 ผลการทดลอง RRT Latency test

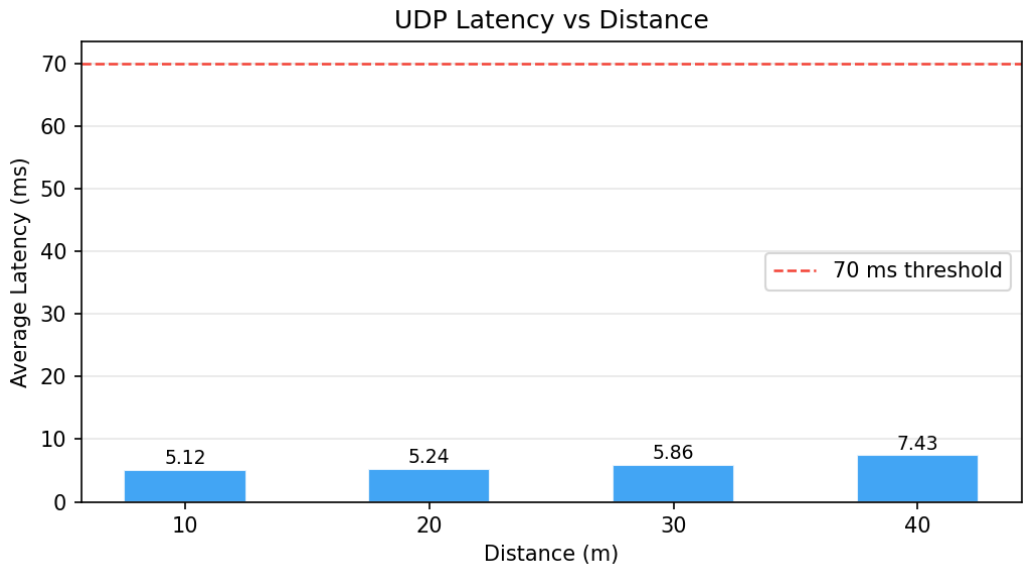
- จำนวนแพ็กเกจ: 100 แพ็กเกจ
- อัตราการสูญเสียข้อมูล (Packet Loss): 0.00%
- ค่าเฉลี่ย (Mean): 5.20 ms
- ค่ามัธยฐาน (Median): 3.18 ms
- ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std Dev): 5.54 ms
- ค่าต่ำสุด (Min): 1.00 ms
- ค่าสูงสุด (Max): 38.72 ms
- Percentile 95: 16.19 ms

- Percentile 99: 23.81 ms

วิเคราะห์ผล: การทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสื่อสารไร้สายมีความเสถียรสูงและมีค่าความหน่วงเฉลี่ย 5.20 ms ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (70 ms) อย่างมาก การกระจายตัวของ Latency มี Median ที่ 3.18 ms แสดงว่าค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วงต่ำ มีเพียงบางค่าเท่านั้นที่สูงขึ้น (Max 38.72 ms) ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนของ WiFi ในช่วงสั้น

4.2.2 Range Test Results

ผลการทดสอบความเสถียรของสัญญาณ WiFi ที่ระยะต่างๆ โดยใช้ UDP ping test จำนวน 100 แพ็กเกจในแต่ละระยะ



ระยะทาง (ม.)	Latency เฉลี่ย (ms)	Packet Loss (%)
10	5.12	0
20	5.24	0
30	5.86	0
40	7.43	0

วิเคราะห์ผล: ระบบสามารถรักษาความเสถียรได้ถึงระยะ 40 เมตร โดยมี Packet loss 0% และ Latency เฉลี่ยเพียง 7.43 ms ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 70 ms ที่กำหนดอย่างมาก ทั้ง 4 ระยะทดสอบผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ระบบ WiFi UDP ของ ESP32-C6 มีความเสถียรสูงในระยะใกล้-กลาง ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานรถบังคับวิทยุในระยะสายตา

4.2.3 ผลการทดสอบการทำงานของ Current Sensor (ACS712)

4.2.4 ผลการทดสอบเพื่อ Calibrate Load Cell (HX711)

ติดน้ำหนักที่ปลายล้อหน้าในท่าตั้งฉากของรถบังคับทั้งซ้ายและขวาทีละด้าน

น้ำหนัก	**ซ้าย (L)**	**ขวา (R)**	**L Scale Factor**	**L Error from average (%)**	**R Scale Factor**	**R Error from average (%)**
100g	19,852	-22,897	198.5	-5.59	229.0	+9.92
200g	46,214	-38,552	231.1	+5.71	192.8	-5.10
300g	64,040	-59,288	213.5	+0.51	197.6	-2.62
400g	81,603	-87,501	204.0	-2.75	218.8	+4.14
500g	108,502	-101,204	217.0	+2.75	202.4	-0.76

Average: L Scale Factor = 211.0, R Scale Factor = 208.1

สูตรที่ได้:

- ซ้าย (Left): $Scale_Factor_L = 211.0$
- ขวา (Right): $Scale_Factor_R = 208.1$

วิเคราะห์ผล: ค่า Scale Factor เฉลี่ย = 211.0 (ซ้าย) และ 208.1 (ขวา) Error สูงสุด = 9.92% (ที่ 100g ขวา) ซึ่งใกล้เคียง ±10% จึงผ่านเกณฑ์

4.2.5 ผลการทดสอบองค์ประกอบ FFB (Component Validation)

4.1.5.1 ผลทดสอบแรงคืนตัว (Steering Stiffness / Self-Centering)

4.1.5.2 ผลทดสอบแรงหน่วง (Damping)

4.1.5.3 ผลทดสอบแรงเสียดทาน (Friction)

4.1.5.4 ผลทดสอบการทำงานของ Load Cell (Steering Resistance Measurement)

4.1.5.5 ผลทดสอบการตรวจจับ Drift

4.1.5.6 ผลทดสอบแรงสั่นสะเทือนพื้นผิว (Surface Jolt)

4.2.6 ผลการทดสอบเชิงปริมาณ (Quantitative Test)

บทที่ 5 บทสรุป

[เนื้อหา]

5.1[หัวข้อ]

[เนื้อหา]

5.1.1 [หัวข้อย่อย]

1. เนื้อหา
2. เนื้อหา

5.2[หัวข้อ]

[เนื้อหา]

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Balachandran, S. M. Erlien, and J. C. Gerdes, "The virtual wheel concept for supportive steering feedback during active steering interventions," in ASME Dynamic Systems and Control Conference, 2014. (Virtual Wheel Concept — สูตรหลักของ FFB)

[2] E. Mehdizadeh and M. Kabganian, "A new force feedback for steer-by-wire vehicles via virtual vehicle concept," in 50th IEEE Conference on Decision and Control, 2011, pp. 6160-6165. (Virtual Vehicle architecture)

[3] IEEE 9568828: "Remote driving testbed with force feedback based on slip angle estimation." (การประมาณ Slip angle และ Drift Detection)

[4] D. I. Katzourakis, D. A. Abbink, and R. Happee, "Steering force feedback for human–machine-interface automotive experiments," IEEE Transactions on Haptics, vol. 3, no. 4, pp. 225-237, 2010. (Haptic steering system design)

[5] C. Wang, Y. Wang, and J. R. Wagner, "Evaluation of alternative steering devices with adjustable haptic feedback for semi-autonomous and autonomous vehicles," SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, vol. 1, no. 2, 2018. (Haptic steering device evaluation methodology)

[6] G. Shakeri, S. A. Brewster, and J. Williamson, "Evaluating haptic feedback on a steering wheel in a simulated driving scenario," in Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2016, pp. 206-217. (Likert scale steering evaluation)

[7] M. Böhle, B. Schick, and S. Müller, "Steering feedback in dynamic driving simulators: The influence of steering wheel vibration and vehicle motion frequency," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 9, no. 3, pp. 1045-1056, 2024. (Steering feedback testing protocol)

[8] Q. Guo, D. Zhao, et al., "Active suspension control strategy of multi-axle emergency rescue vehicle based on inertial measurement unit," Sensors, vol. 21, no. 4, p. 1256, 2021. (IMU-based control and sensor fusion)

[9] S. Du, J. Wang, et al., "Improving observability of an inertial system by rotary motions of an IMU," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 11, pp. 3082-3090, 2017. (Sensor fusion for drift reduction)

[10] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers (SAE), 1992. (พลศาสตร์ยานพาหนะพื้นฐาน)

[11] H. Mohellebi and A. Kheddar, "Adaptive haptic feedback steering wheel for driving simulators," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 2, pp. 660-671, 2009. (Adaptive haptic feedback)

[12] D. Karimi and D. Mann, "Torque feedback on the steering wheel of agricultural vehicles," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 65, no. 1, pp. 77-84, 2009. (Steering system resistance และ road feel)