

# การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้า



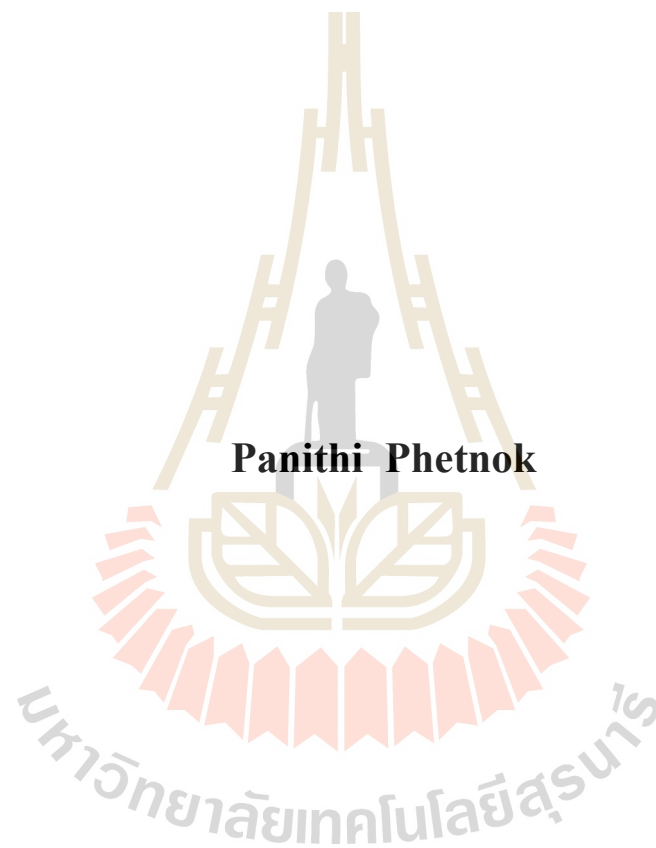
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**DESIGN AND IMPLEMENT OF DRIVE CONTROL  
SYSTEM FOR ELECTRIC GOLF CART**



**Panithi Phetnok**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

## การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการขับขี่สำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้า

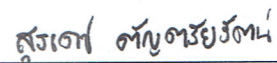
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สุรเดช ตัญญูชัยรัตน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



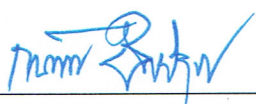
(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปณิธิ เพ็ชรนอก : การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้า  
(DESIGN AND IMPLEMENT OF DRIVE CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC  
GOLF CART) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สุรเดช ตัญจรัยรัตน์, 86 หน้า.

เทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนการขับเคลื่อนของยานยนต์ในอนาคต  
เนื่องจากมีระบบควบคุมและตัวตรวจวัด เช่น ระบบนำทางและช่วยขับขี่ (Auto-pilot) ที่มีการส่ง  
ข้อมูลตำแหน่งด้วยดาวเทียม เพื่อให้ผู้ขับขี่สามารถกำหนดเส้นทางให้ยานยนต์สามารถขับต่อไปได้  
เองโดยไม่จำเป็นต้องมีผู้ขับขี่ ทำให้ผู้ขับขี่มีความสะดวกสบายมากขึ้นและปลอดภัยมากขึ้น

ในการพัฒนารถยนต์เพื่อให้เป็นรถยนต์อัตโนมัติมีค่าใช้จ่ายที่สูง ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษา  
และออกแบบจากรถกอล์ฟไฟฟ้าแทน เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่ารถยนต์และมีระบบควบคุมทางกลที่  
คล้ายกับรถยนต์ โดยรถกอล์ฟไฟฟ้ามีต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าและถูกปรับปรุงระบบควบคุม  
ทางกลเป็นระบบควบคุมด้วยไฟฟ้า (Drive by wire) ประกอบด้วย ระบบคันเร่ง ระบบบังคับเลี้ยว  
และระบบเบรก ซึ่งควบคุมโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino UNO), บอร์ด Pixhawk และ  
ชุดมอเตอร์กระแสตรง ทำให้สามารถบังคับรถกอล์ฟได้ด้วยสัญญาณพัลส์แทน และสร้างเส้นทาง  
การเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรม QGround control ด้วยการกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยดาวเทียม (GPS)  
ในการควบคุมระบบนั้นต้องให้ความสำคัญและเที่ยงตรงจึงได้ออกแบบระบบควบคุม โดยการสร้าง  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบและปรับปรุงระบบให้  
มีเสถียรภาพจากการปรับแต่งอัตราขยายด้วยระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID)  
เพื่อให้ได้ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพตามต้องการ

ผลการทดสอบการกำหนดตำแหน่งให้รถเคลื่อนที่อัตโนมัติ และควบคุมความเร็วที่  
เฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที รถกอล์ฟสามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดต่าง ๆ ได้ระยะทาง 400 ถึง 800 เมตร  
โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.5 เมตร จากจุด Setpoint และสามารถหยุดรถฉุกเฉินเมื่อมีสิ่ง  
กีดขวางในช่วงความเร็วต่ำกว่า 1.8 เมตรต่อวินาที

PANITHI PHETNOK : DESIGN AND IMPLEMENT OF DRIVE CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC GOLF CART. THESIS ADVISOR : SURADET TANTRAIRATN, Ph.D., 86 PP.

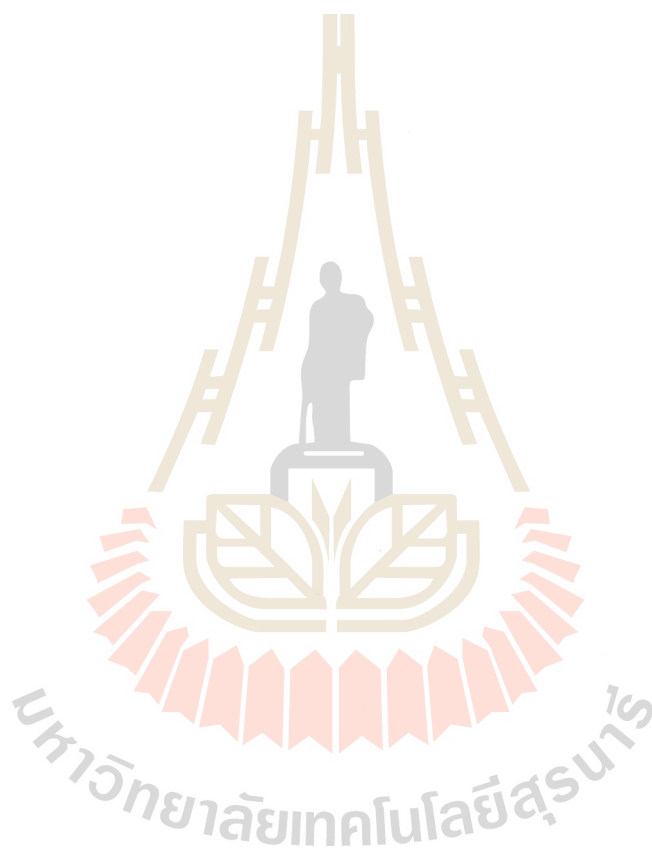
## DRIVE BYWIRE/PID/ARDUINO/AUTONOMOUS

Autonomous car is technology to transform the driving of vehicles in the future because of control systems and sensors, such as autopilot. The location information is transmitted by satellite to the driver to determine the path of the vehicle can continue its own without a driver. This reason makes the driven comfort and safety.

Cost to an autonomous vehicle cost is expensive. There are a lot of research to study and implement of the electric golf cart, because it's cheaper than a car and it has a same mechanism. The golf cart banded club car DS was drive with electric motor 36V and mechanism system, rack and pinion are control steer system, linkage connected with pedal control drum brake and throttle system. The original mechanism was replaced with drive by wire system, DC motor is used as actuator with encoder to control angular position using Arduino UNO. Pixhawk is main processor to control drive by wire system by PWM signal, QGround control is software to navigate golf cart by Global Navigation Satellite System onboard. PID controller gains were implemented for the feedback control system of the drive-by-wire system. The proposed method can obtain the good quality of control performance as requirement.

Golf cart be driven autonomous using drive by wire system in range of 800 meter with speed limit of 3 meter per second. It has a maximum error from setpoint 1.5 meter.

When golf cart has the obstacle in range 1 meter from front wheels and diffuse sensor can detect, emergency brake will activate immediately.



School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature 

Advisor's Signature สุรพงษ์ ตัญญาชัยมงคล

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ผู้จัดทำได้รับการอนุเคราะห์จาก บุคคลหลายฝ่ายที่ให้คำปรึกษา การแนะนำแนวคิดการทำวิจัย และการช่วยเหลืออย่างดี ดังนี้

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ คณบดีสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คอยให้คำแนะนำและการสนับสนุน ในการทำงานมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.สุรเดช ตัญญูรัตน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลหลักสูตร วิศวกรรมอากาศยาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำคำปรึกษาและแนวคิดต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาตลอดการทำงานวิจัยรวมทั้งการตรวจทานและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จ สมบูรณ์

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และ ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว ที่ได้เสียสละเวลาให้ความรู้ และให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการทำวิจัยรวมทั้งตรวจสอบแก้ไขในงานวิจัยมีความถูกต้อง และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่มอบทุนการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษา และบุคลากรทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการทำวิจัย และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้ กล่าวนามทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และสามารถทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทำให้ได้รับความรู้ ประสบการณ์และทักษะต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูสั่งสอน สนับสนุนทางการศึกษา รวมทั้งให้กำลังใจเป็นอย่างดีมาตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จเสมอมา

สุดท้ายนี้ขออาราธนา สิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายจงดลบันดาลให้บุคคลทั้งหลายที่ได้กล่าวนาม และไม่ได้กล่าวนาม จงมีแต่ความสุขและความเจริญในชีวิตตลอดไปเรื่อยมา

ปณิธิ เพ็ชรนอก

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous car).....	4
2.3 รถกอล์ฟ Club car DS.....	8
2.3.1 ระบบบังคับเลี้ยวแบบเฟืองสะพาน (Rack and Pinion).....	9
2.3.1 ระบบครัมเบรก (Drum brake).....	10
2.3.1 ระบบคันเร่ง (Throttle system).....	11
2.4 มอเตอร์กระแสตรง.....	11
2.4.1 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง.....	12
2.5 วิธีการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation).....	13
2.6 เอ็นโค้ดเดอร์แบบแกนหมุน.....	14
2.6.1 ส่วนประกอบของ Digital rotary encoder ชนิด Incremental แบบ Optical.....	14



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	ระบบควบคุม (Control system).....	14
2.7.1	ระบบควบคุมวงเปิด (Open loop control).....	15
2.7.2	ระบบควบคุมวงปิด (Close loop control).....	15
2.7.3	การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller).....	16
2.7.4	การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification).....	18
2.8	อุปกรณ์ควบคุมการบินอัตโนมัติ.....	20
2.8.1	Pixhawk.....	20
2.8.2	Sirius RTK GNSS Rover (M8P).....	22
2.8.3	รีโมทควบคุมและตัวรับสัญญาณ (Remote and receiver).....	22
2.8.4	เซนเซอร์ชนิดใช้แสงประเภทตรวจจับโดยตรง (Diffuse-reflective optical sensor).....	23
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>24</b>
3.1	บทนำ.....	24
3.2	การออกแบบและสร้างกลไก Drive by wire.....	26
3.2.1	กลไกระบบควบคุมบังคับเลี้ยว (Steer by wire).....	27
3.2.2	กลไกระบบควบคุมคันเร่ง (Throttle by wire).....	29
3.2.3	กลไกระบบควบคุมเบรก (Brake by wire).....	30
3.3	การออกแบบวงจรควบคุมกลไก (Drive by wire Control).....	31
3.3.1	การระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมพวงมาลัย (System identification).....	32
3.3.2	Model validation.....	34
3.3.3	การใช้ MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ PID controller.....	35
3.4	การสร้างระบบนำทางด้วย GPS.....	36
3.5	การสร้างระบบเบรกฉุกเฉิน.....	37
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>39</b>
4.1	บทนำ.....	39

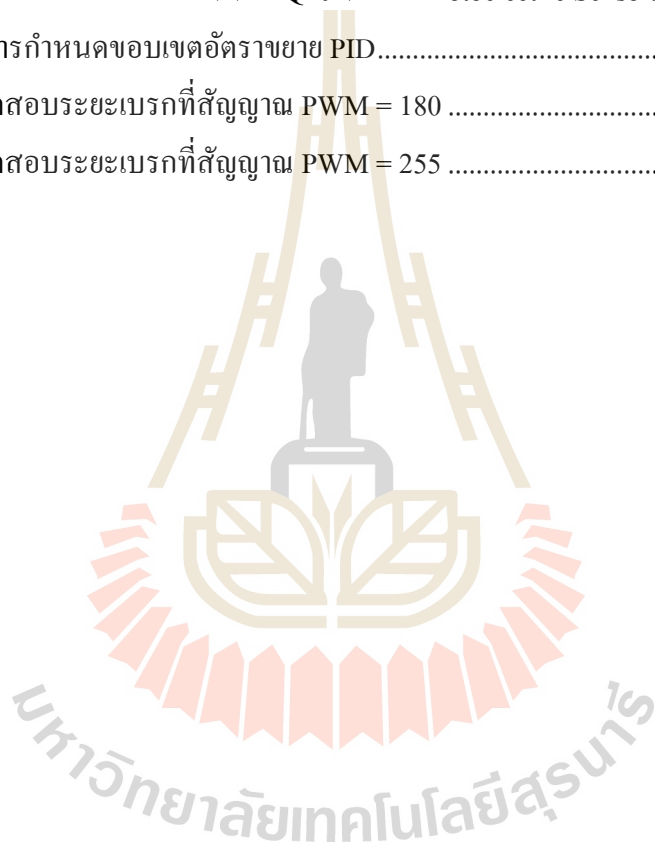
## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	รถกอล์ฟและระบบ Drive by wire.....	39
4.2.1	ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบ Steer by wire.....	40
4.2.2	ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบ Steer by wire.....	42
4.3	ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบ Steer by wire.....	43
4.4	ผลการทดลองการวิ่งทดสอบด้วยระบบนำทาง GPS.....	44
4.4.1	การทดสอบการควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟ (Cruise speed control).....	44
4.4.2	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็วสูงสุด 3 เมตรต่อวินาที.....	48
4.4.3	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็วสูงสุด 4 เมตรต่อวินาที.....	46
4.4.4	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ P = 1.6, I = 0.01.....	47
4.4.5	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ P = 2, I = 0.01.....	49
4.4.6	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ P = 2.2, I = 0.01.....	51
4.4.7	ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ P = 2.2, I = 0.01.....	52
4.5	การทดสอบระบบเบรก (Brake by wire).....	54
4.5.1	การทดสอบระบบเบรกฉุกเฉิน (Emergency brake).....	55
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	57
	รายการอ้างอิง.....	58
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลทางเทคนิคของ MITSUBISHI FX1N-60MR-ES/UL.....	59
	ภาคผนวก ข. ขั้นตอนการตั้งค่าภาพต้นแบบของวิชชันซิสเต็ม.....	66
	ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	73
	ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรม QGround control.....	76
	ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	80
	ประวัติผู้เขียน.....	86

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการตอบสนองของการปรับค่าอัตราขยาย PID ต่อระบบ.....	18
2.2 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ BANNER Q20NDXL Photoelectric Sensor.....	23
3.1 เงื่อนไขการกำหนดขอบเขตอัตราขยาย PID.....	36
4.1 ผลการทดสอบระยะเบรกที่สัญญาณ PWM = 180 .....	54
4.2 ผลการทดสอบระยะเบรกที่สัญญาณ PWM = 255 .....	54



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติระดับ 0 และ 1 .....	5
2.2 ภาพจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติระดับ 2 .....	5
2.3 ภาพจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติระดับ 3 .....	6
2.4 ภาพจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติระดับ 4 .....	6
2.5 ภาพจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติระดับ 5 .....	7
2.6 รถกอล์ฟที่ถูกดัดแปลงให้สามารถใช้ระบบอัตโนมัติ .....	8
2.7 รถกอล์ฟ Club car รุ่น DS 2005 .....	9
2.8 กลไกการบังคับล้อ .....	9
2.9 กลไกครั้บเบรก .....	10
2.10 Wiper switch .....	11
2.11 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรง .....	12
2.12 ลักษณะคลื่น PWM .....	13
2.13 การทำงานของ Rotary encoder .....	14
2.14 Block diagram ระบบควบคุมแบบเปิด .....	15
2.15 แผนภาพระบบควบคุมวงปิด .....	16
2.16 ตัวแปรทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง .....	19
2.17 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของควบคุมระบบของ Pixhawk .....	20
2.18 Pixhawk 3 Pro ผลิตโดย Drotek® and PX4 .....	21
2.19 Sirius RTK GNSS Rover (M8P) .....	22
2.20 รีโมทควบคุมใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz .....	23
3.1 แผนผังการดำเนินงาน .....	24
3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 24V .....	27
3.3 Incremental rotary encoder .....	27
3.4 ข้อต่อพวงมาลัยกับรอกตัวตามขนาด 60 ฟัน .....	28
3.5 การออกแบบการติดตั้งด้วยโปรแกรม SolidWorks .....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การติดตั้งมอเตอร์ควบคุมระบบบังคับเลี้ยว ต้นแบบที่ 1 .....	28
3.7 แบบจำลองกลไกดั้งเดิมของรถกอล์ฟ .....	29
3.8 กลไกต่อโยงติดตั้งเข้ากับเป็นเหยียบและมอเตอร์บนรถกอล์ฟ.....	29
3.9 แบบจำลองระบบเบรกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks .....	30
3.10 การติดตั้งกลไกระบบควบคุมเบรกเข้ากับรถกอล์ฟ.....	30
3.11 แผนภาพการควบคุมมอเตอร์แบบวงเปิด.....	31
3.12 ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์แบบวงปิด .....	32
3.13 วิธีการต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมมอเตอร์แบบวงปิด .....	32
3.14 ขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม CIFER .....	33
3.15 สัญญาณ Input (PWM) แบบ Sweep สำหรับทดสอบระบบ .....	34
3.16 สัญญาณ Output (degree) แบบ Sweep สำหรับทดสอบระบบ .....	34
3.17 Block diagram เปรียบเทียบแบบจำลองโดย Simulink จาก Input ตัวเดียวกัน .....	35
3.18 Block diagram close loop control steering system.....	35
3.19 เงื่อนไขสำหรับผลลัพธ์การตอบสนองของระบบ.....	36
3.20 การเชื่อมต่อ Pixhawk กับ โมดูลต่าง ๆ.....	37
3.21 ลักษณะการตรวจจับวัตถุด้วยเซ็นเซอร์ .....	37
3.22 การติดตั้งเซ็นเซอร์แสงที่ด้านข้างตัวรถ.....	38
4.1 รถกอล์ฟที่ติดตั้งระบบ Drive by wire .....	40
4.2 ระบบควบคุม Steer by wire ต้นแบบที่ 2.....	40
4.3 กราฟแสดงผล System identification ด้วย Frequency response.....	41
4.4 ผลการตรวจสอบ Transfer function .....	41
4.5 Steer by wire close loop control โดยไม่มี PID control .....	42
4.6 Steer by wire close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID.....	42
4.7 Throttle by wire Close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID .....	43
4.8 Steer by wire Close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID ณ วินาทีที่ 51 .....	43
4.9 เส้นทางการเดินรถเพื่อทดสอบ Cruise speed control.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการทดสอบ Cruise speed control ที่ Setpoint 3 m/s.....	45
4.11 แผนที่เส้นการวิ่งตาม Setpoint ที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที .....	45
4.12 ผลการทดสอบและลำดับการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที.....	46
4.13 ลำดับการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็ว 4 เมตรต่อวินาที .....	46
4.14 แผนที่เส้นการวิ่งตาม Setpoint ที่ P = 1.6, I = 0.01.....	47
4.15 ผลการทดสอบเส้นทางการวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่ P = 1.6, I = 0.01.....	48
4.16 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 1 ด้วย P = 1.6, I = 0.01.....	48
4.17 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 2 ด้วย P = 1.6, I = 0.01.....	49
4.18 ผลการทดสอบเส้นทางการวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่ P = 2.0, I = 0.01.....	49
4.19 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 1 ด้วย P = 2.0, I = 0.01 .....	50
4.20 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 2 ด้วย P = 2.0, I = 0.01 .....	50
4.21 ผลการทดสอบเส้นทางการวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่ P = 2.2, I = 0.01.....	51
4.22 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 2 ด้วย P = 2.2, I = 0.01.....	52
4.23 ผลการทดสอบเส้นทางการวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่ P = 2.0 I = 0.05.....	52
4.24 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 1 ด้วย P = 2.0, I = 0.05 .....	53
4.25 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 2 ด้วย P = 2.0, I = 0.05 .....	53
4.26 การทดสอบระบบเบรกฉุกเฉิน .....	55
ง.1 การกำหนด Firmware เป็น Firmware Version 1.6.5.....	77
ง.2 การเลือก Airframe ให้ตรงกับอุปกรณ์ .....	77
ง.3 Calibration sensor .....	78
ง.4 Calibration remote .....	78
ง.5 การสร้าง Setpoint.....	79
ง.6 Datalogger.....	79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เทคโนโลยีทางวิศวกรรมยานยนต์กำลังถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วจากค่ายผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำ โดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ขับขี่และผู้โดยสารพร้อมกับความปลอดภัย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของรถยนต์ เทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนการขับขี่บนท้องถนนให้มีความสะดวกสบายแก่ผู้ขับขี่มากที่สุดเป็นการนำระบบที่สามารถเข้ามาควบคุมรถยนต์ได้แทนผู้ขับขี่ หรือเทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติ ที่ระบบควบคุมกลไกการขับขี่ (Drive by wire) ถูกพัฒนาต่อยอดมาจากระบบควบคุมกลไกการบิน (Fly by wire)

เทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติ นั้นผู้ขับขี่จะถูกแทนที่ด้วยระบบควบคุมกลไกการขับขี่ ซึ่งประกอบไประบบควบคุมแบบปิด (Close loop control) ทำให้สามารถออกแบบผลการตอบสนองได้และลดข้อผิดพลาดจะถูกเขียนโปรแกรมและคำนวณไปยังชุดประมวลผลคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Microcontroller) ที่ถูกออกแบบให้ควบคุมชุดกลไก (Actuator) ควบคุมระบบบังคับเลี้ยว คันเร่ง และเบรก ทดแทนความสามารถของผู้ขับขี่ โดยมีระบบป้อนกลับ (Feedback) ที่ตรวจวัดผลการทำงานของกลไกจากตัวตรวจวัด (Sensor) ซึ่งทุกระบบจะต้องทำงานร่วมกันโดยเนื่องไขการตัดสินใจจะถูกตรวจสอบจากสภาพแวดล้อมผ่านกล้องที่จับภาพและประมวลผล (Image processing) ด้วยการสร้างระบบโครงข่ายประสาทสำหรับเครื่องจักร (Deep learning) เพื่อให้ตัดสินใจได้เสมือนผู้ขับขี่หรือดีกว่า

ในการศึกษาและออกแบบติดตั้งเทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติในรถยนต์นั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงเลือกศึกษาและออกแบบจากรถกอล์ฟไฟฟ้าแทน เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่ารถยนต์และมีระบบที่คล้ายคลึงกับรถยนต์ รถกอล์ฟไฟฟ้ามาตรฐานที่ใช้ทั่วไป ตั้งแต่ 2-8 ที่นั่ง แต่เดิมแล้วรถกอล์ฟนี้ จะใช้ในสนามกอล์ฟเป็นหลัก ต่อมามีการนำไปใช้ในวัตถุประสงค์อื่น เช่น เจ้าของโครงการหมู่บ้าน ใช้ในการพาผู้สูงอายุไปชมบ้านในโครงการ โรงพยาบาลใช้ในการเคลื่อนรับส่งผู้มาใช้บริการ เพื่อเดินทางจากตึกหนึ่งสู่อีกตึกหนึ่งจากลานจอดรถโรงพยาบาลไปสู่อาคารผู้ป่วย หรือใช้สำหรับให้บุคคลากรทางการแพทย์โดยสาร รีสอร์ทหรือโรงแรมที่มีพื้นที่กว้างหรือห่างไกลถนนก็จะใช้ในการรับส่งลูกค้าที่มาพักอาศัยจำเป็นต้องมีคนขับรถประจำ 1 ตำแหน่งเป็นอย่างน้อย

ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติจะออกแบบมาให้สามารถขับรถออลฟ์ไปยังจุดหมายที่กำหนด โดยมีระบบควบคุมกลไกการขับเคลื่อนที่ใช้ Microcontroller Arduino UNO R3 เป็นตัวควบคุมมอเตอร์ที่เป็น Actuator สำหรับระบบบังคับเลี้ยว ระบบคันเร่ง และระบบเบรก ที่ใช้ตัวตรวจวัดตำแหน่ง (Encoder) เป็นตัวตรวจสอบตำแหน่งและส่งข้อมูลป้อนให้กับระบบ ในการกำหนดจุดหมายจะกำหนดพิกัดตำแหน่งผ่านโปรแกรม QGround control ซึ่งทำงานร่วมกับบอร์ดควบคุม Pixhawk และ GPS ที่สามารถวัดตำแหน่งและความเร็วของรถออลฟ์ เพื่อส่งข้อมูลไปยังบอร์ด Arduino ผ่านรูปแบบสัญญาณ PWM (Pulse width modulation)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ปรับปรุงรถออลฟ์ไฟฟ้าจากเดิมที่เป็นระบบบังคับด้วยกลไกโดยเพิ่มชุดควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยว คันเร่งและเบรก ด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Drive by wire) ซึ่งจะสามารถควบคุมรถออลฟ์ไปยังจุดหมายที่ต้องการผ่านการกำหนดพิกัดจุดด้วยโปรแกรม QGround control โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อย ดังนี้

- 1) ศึกษาการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) ศึกษาและออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับของตำแหน่งการหมุนมอเตอร์กระแสตรงด้วยวิธีการการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ อินทิเกรต (PID controller) เพื่อปรับปรุงผลการตอบสนองโดยใช้ Encoder เป็นตัวตรวจวัด
- 3) รถออลฟ์สามารถเคลื่อนที่อัตโนมัติไปยังพิกัดจุดที่กำหนดไว้ได้โดยไม่ใช้ผู้ขับขี่

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ

- 1) ปรับปรุงรถออลฟ์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดสองที่นั่งรุ่น club car DS 2005 ให้สามารถควบคุมระบบบังคับเลี้ยว คันเร่ง และเบรก ด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive by wire) ด้วยการติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงและตัววัดตำแหน่ง (Encoder)
- 2) เมื่อไม่มีการจ่ายไฟหรือใช้การควบคุมจากมอเตอร์ยังสามารถบังคับรถได้
- 3) ออกแบบระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control) ที่ควบคุมระบบ Drive by wire ด้วยการ ใช้ Arduino UNO R3 ส่งสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ผ่านบอร์ด Cytron MD30A ด้วย PID controller



4) สามารถขับเคลื่อนอัตโนมัติได้จากการกำหนดตำแหน่งโดยโปรแกรม QGround Control ร่วมกับการใช้บอร์ด Pixhawk

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบังคับเลี้ยวได้
- 1.5.2 สามารถควบคุมตำแหน่งและผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.5.3 รถกอล์ฟสามารถใช้โมทบังคับวิทยุควบคุมได้
- 1.5.4 สามารถพัฒนาต่อยอกรถกอล์ฟเพื่อให้สามารถขับเคลื่อนอัตโนมัติได้
- 1.5.5 สามารถใช้เป็นสื่อการสอนของการใช้ระบบควบคุมกลไกของรถอัตโนมัติ



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

วิศวกรผู้ออกแบบรถยนต์พยายามที่จะทำให้รถยนต์มีกำลังหรือแรงม้าสูงและมีอัตราการกินน้ำมันให้น้อยที่สุด ค่ากับแรงม้าที่ออกมามากที่สุด มีมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศให้น้อยที่สุด ระบบที่เคยเป็นแบบกลไกจึงไม่สามารถควบคุมให้เป็นไปอย่างที่ต้องการได้ เพราะมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็ว ความแม่นยำ และขนาด จึงได้มีการคิดค้นและออกแบบระบบควบคุมกลไกช่วยขับขี่

ระบบกลไกช่วยขับขี่ (Drive by wire) ถูกพัฒนาขึ้นแทนที่การส่งกำลังโดยกลไกข้อต่อแบบดั้งเดิมที่มีตัวกระตุ้น (Actuator) และระบบควบคุมทางไฟฟ้า (Controller) มาช่วยในการเคลื่อนที่กลไกให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้ยังสามารถลดชิ้นส่วนกลไกให้น้อยลง และสามารถพัฒนาต่อยอดให้รถยนต์นั้นขับเคลื่อนได้อัตโนมัติโดยการเพิ่มเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เข้ามาช่วยตรวจสอบสภาพแวดล้อม พร้อมส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ให้ประมวลผลตัดสินใจตามเงื่อนไขที่ได้ทำการเรียนรู้จากเทคโนโลยี Deep learning ที่ในปัจจุบันพัฒนาให้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ

Pratik and Ketan (2012) ได้แนะนำระบบ Drive by wire ในรถยนต์ โดยมีระบบหลักอยู่ 3 ระบบ คือ (1) ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว Steer by wire (2) ระบบควบคุมคันเร่ง Throttle by wire (3) ระบบควบคุมเบรก Brake by wire ทุกระบบจะมีตัวตรวจวัดและตัวกระตุ้นที่ถูกควบคุมโดย ECU โดยทั้งหมดนี้จะถูกออกแบบและใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ยุคปัจจุบัน

#### 2.2 ระบบขับขี่อัตโนมัติ (Autonomous car)

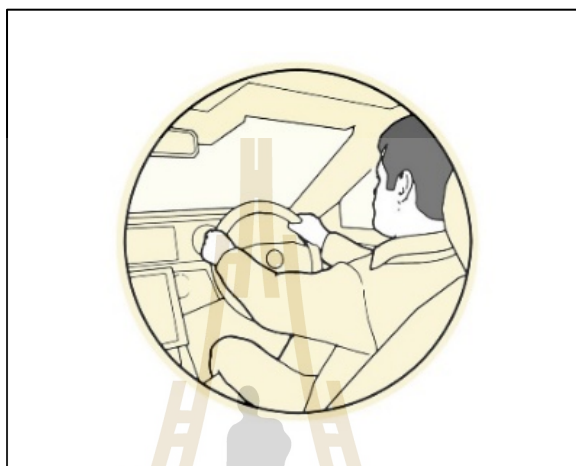
องค์กรด้านยานยนต์ได้ออกแนวทางในการวัดความอัตโนมัติของการขับขี่โดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineers, SAE) เพื่อทำความเข้าใจระหว่างผู้ผลิตกับผู้ขับขี่ถึงสมรรถนะและข้อจำกัดของระบบอัตโนมัติที่มีในรถยนต์ ไว้ทั้งหมด 6 ระดับ ดังนี้

**ระดับ 0 : ระบบอัตโนมัติไม่สามารถควบคุมรถได้**

ระดับนี้คือระดับที่การขับขี่ในทุกด้านอยู่ใต้การควบคุมของผู้ใช้ ระบบอัตโนมัติจะแจ้งเตือนเท่านั้น เช่น เสียงเตือนเมื่อเข้าใกล้สิ่งกีดขวางตอนจอดครด เสียงเตือนเมื่อผู้ใช้ขับคร่อมเลน เป็นต้น

### ระดับ 1 : ระบบช่วยเหลือการขับขี่

ระดับนี้ระบบจะช่วยในการควบคุมพวงมาลัยหรือคันเร่ง และเบรกอย่างใดอย่างหนึ่ง ผู้ขับขี่ต้องควบคุมส่วนที่เหลือทั้งหมด เช่น ระบบช่วยจอดอัตโนมัติ (Parking Assistance Automatic, PAA) ระบบครุสคอนโทรล (Cruise control) เพื่อควบคุมและรักษาความเร็วที่ตั้งไว้



รูปที่ 2.1 ภาพจำลองการขับขี่อัตโนมัติระดับ 0 และ 1 (ที่มา: www.autodeft.com)

### ระดับ 2 : ระบบอัตโนมัติบางส่วน

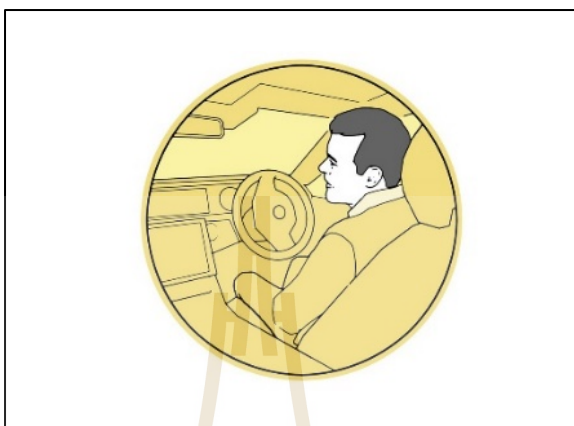
ระดับนี้ระบบจะช่วยในการควบคุมพวงมาลัย คันเร่ง และเบรก แต่ผู้ขับขี่ต้องคอยตรวจสอบสภาพการจราจรรอบรถเพื่อเข้าควบคุมรถได้ทันที



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองการขับขี่อัตโนมัติระดับ 2 (ที่มา: www.autodeft.com)

### ระดับ 3 : ระบบอัตโนมัติอย่างมีเงื่อนไข

ระบบระบบจะควบคุมการขับขี่ทั้งหมดและผู้ขับไม่ต้องตรวจตราสภาพแวดล้อม แต่ต้องพร้อมที่จะเข้าควบคุมการขับขี่ในสถานการณ์ที่ไม่ปกติ เมื่อระบบร้องขอ



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการขับขี่อัตโนมัติระดับ 3 (ที่มา: [www.autodeft.com](http://www.autodeft.com))

### ระดับ 4 : ระบบอัตโนมัติระดับสูง

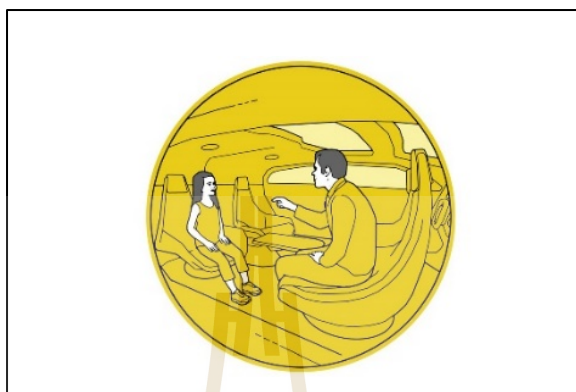
ระดับนี้ระบบจะไม่ต้องการความช่วยเหลือจากผู้ขับขี่เลย แต่อาจจะใช้งานได้ ในสภาพแวดล้อมที่ จำกัด เช่น การขับบนทางหลวงเท่านั้น หรือขับในพื้นที่ปิดที่กั้นไว้โดยเฉพาะเท่านั้น เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองการขับขี่อัตโนมัติระดับ 4 (ที่มา: [www.autodeft.com](http://www.autodeft.com))

### ระดับ 5 : ระบบอัตโนมัติแบบสมบูรณ์

ระบบนี้คือรถอัตโนมัติโดยสมบูรณ์ที่ไม่ต้องการผู้ขับขี่เลย ผู้โดยสารไม่จำเป็นต้องเข้าควบคุมรถ ระบบอัตโนมัติจะเป็นคนกำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจในการขับขี่



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการขับขี่อัตโนมัติระดับ 5 (ที่มา: [www.autodeft.com](http://www.autodeft.com))

รอยต่อสำคัญอยู่ระหว่างระดับ 2 กับระดับ 3 เพราะในระดับ 0 ถึง 2 นั้น ผู้ขับขี่ยังต้องมีสติคอยมองถนนและรถคันอื่นและพร้อมเข้าควบคุมรถยนต์ทันที ดังนั้น ระบบระดับนี้ จึงเป็นเพียงการผ่อนภาระบางด้านของผู้ขับเท่านั้น แต่ในระบบอัตโนมัติระดับ 3 ขึ้นไปนั้น ผู้ขับขี่ไม่ต้องสนใจสภาพแวดล้อมข้างทางเลย แต่อาจต้องรอฟังคำสั่งของของรถในกรณีที่ระบบพิจารณาแล้วว่าไม่สามารถควบคุมรถและแก้สถานการณ์เองได้

Vicente et al. (2009) ได้ทำการดัดแปลงระบบบังคับความเร็วในรถยนต์ส่วนบุคคลโดยการเพิ่มมอเตอร์กระแสตรงและเอ็นโคตเตอร์ โดยใช้ระบบควบคุมวงปิดแบบ PID ในการบังคับความเร็ว รวมถึงด้วยสัญญาณ PWM และได้ทดสอบบังคับความเร็วในการขับขี่จริงโดยกำหนดเส้นทางผ่าน RTK-DGPS เพื่อทดสอบผลตอบแทนที่ผ่านระบบควบคุมแบบ Fuzzy-logic โดยผลการทดสอบสามารถขับขี่ได้ตามเส้นทางที่กำหนด โดยไม่ออกจากเส้นทางถือว่าเป็นระบบอัตโนมัติลำดับสอง เพราะต้องการให้ผู้ขับขี่ตรวจเช็คสภาพแวดล้อม

Scott et al. (2015) ได้ทำการสร้างรถกอล์ฟอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.6 และทดสอบใช้ในสวนสาธารณะที่ประเทศสิงคโปร์ เปิดให้ผู้คนที่เดินสวนสามารถใช้แอปพลิเคชันสามารถเรียกรถกอล์ฟอัตโนมัตินี้ได้ โดยทำการสำรวจและสอบถามเกี่ยวกับยานพาหนะอัตโนมัติ เพื่อให้ให้เกิดการยอมรับจากผู้ใช้งานจะต้องออกแบบให้มีความแข็งแกร่งต่อโครงสร้างความน่าเชื่อถือต่อระบบปฏิบัติการและความปลอดภัยต่อผู้คนที่ใช้งาน ในส่วนของรถกอล์ฟเริ่มต้นดัดแปลง

รถกอล์ฟผ่านการเพิ่มมอเตอร์และระบบควบคุมไปยังพวงมาลัย คันเร่ง และเบรก เพื่อให้สามารถบังคับโดยผ่านสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive by wire) ได้ หลังจากนั้นได้ทำการเพิ่มตัวตรวจวัด LIDAR Ultrasonic sensor และกล้อง สำหรับตรวจจับวัตถุรอบตัวรถและสร้างแผนที่สำหรับการเดินทาง ในการสร้างเงื่อนไขการตัดสินใจของรถกอล์ฟจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่สามารถประมวลผลผ่านโมเดลที่ถูกทดสอบมาแล้วว่าสามารถจำแนกผู้คน รถ และตรวจสอบสภาพแวดล้อมได้ถือว่าเป็นระบบอัตโนมัติระดับ 3



รูปที่ 2.6 รถกอล์ฟที่ถูกดัดแปลงให้สามารถใช้ระบบอัตโนมัติ (Scott et al., 2015)

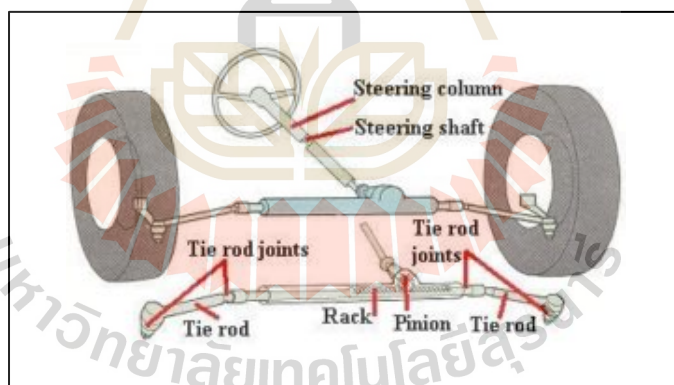
### 2.3 รถกอล์ฟ Club car DS

รถกอล์ฟไฟฟ้า 2 ที่นั่ง มอเตอร์กระแสตรง สำหรับขับเคลื่อนขนาด 36V ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 6V ต่ออนุกรมกันจำนวน 6 ลูก ควบคุมความเร็วผ่าน Wiper switch ที่มีกลไกต่อเข้ากับคันเร่งทำให้สามารถทำความเร็วได้สูงสุด 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถกอล์ฟไฟฟ้า เป็นรูปแบบที่คนนิยมใช้กันมากที่สุด ด้วยสาเหตุที่จุดเด่นของรถกอล์ฟไฟฟ้าคือ ปลอดภัย ไม่มีควัน หรือเสียงดังรบกวนในขณะที่ใช้งาน นอกจากนี้การใช้ไฟฟ้านั้นมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการใช้น้ำมันของรถกอล์ฟแบบเครื่องยนต์โดยรถกอล์ฟนั้นมีระบบกลไกที่น่ากลัวถึง จะหาวิธีการอย่างไรที่จะสามารถตัดแยกชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 รถกอล์ฟ Club car รุ่น DS 2005

### 2.3.1 ระบบบังคับเลี้ยวแบบเฟืองสะพาน (Rack and Pinion)



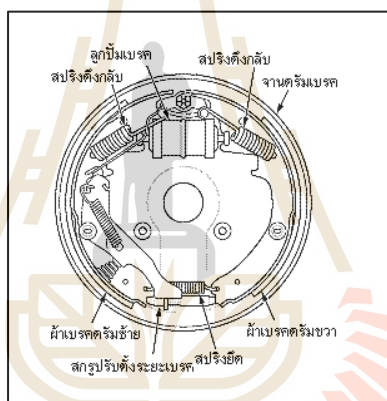
รูปที่ 2.8 กลไกการบังคับล้อ (ที่มา: <https://www.themotorombudsman.org>)

ระบบบังคับเลี้ยวแบบเฟืองสะพานเหมาะสำหรับใช้กับรถยนต์ขนาดเล็ก และรถแข่ง เป็นชุดพวงมาลัยแบบง่าย ทำงานโดยตรง มีความไว และคล่องตัวในการทำงานมาก จึงมักนิยมใช้กับรถยนต์ขนาดเล็กทั่วไป มีอัตราทดต่ำทำให้พวงมาลัยหนักหากต้องการให้มีอัตราทดสูงต้องทำให้เฟืองพินเนียน (Pinion) ตัวเล็กลงแต่จะทำให้ความแข็งแรงลดลง โภคของชุดพวงมาลัยบังคับเลี้ยวมีชิ้นส่วนน้อยใช้เฟืองต่อเฟืองขบกัน ระยะฟรีจึงมีน้อยมาก เมื่อหมุนพวงมาลัย เฟือง

พินิเยนจะจับเฟืองสะพาน (Rack) เคลื่อนที่ไปมา โดยที่ปลายเฟืองสะพานซึ่งมีคันทันส่งต่อ (Tie rods) อยู่จะทำให้แขนบังคับเลี้ยวบิดตาม ทำให้รถเลี้ยวได้ตามต้องการเฟืองในชุดเฟืองพวงมาลัย ไม่เพียงแต่จะบังคับล้อหน้า แต่ในเวลาเดียวกันจะทำหน้าที่เป็นเฟืองลดแรงในการหมุนพวงมาลัย โดยการเพิ่มแรงบิดส่งกำลังอัตราส่วนการลดเรียกว่า “อัตราส่วนเฟืองในการบังคับเลี้ยว”

### 2.3.2 ระบบดรัมเบรก (Drum brake)

ระบบดรัมเบรกของรถกอล์ฟคันนี้ส่งถ่ายกำลังโดยแรงดึงจากแป้นเบรกและไม่มีตัวช่วยทดกำลัง โดยจะเบรกที่ 2 ล้อหลังทำงานโดยใช้หลักการของแรงผลึก เพื่อทำให้ล้อรถเกิดแรงเฉื่อย ซึ่งภายในตัวดรัมเบรกจะมีฝักเบรกที่ประกอบไปด้วยผ้าเบรก สปริง และลูกสูบที่ต่อเข้ากับสายเบรก ดังนั้นเมื่อเหยียบเบรคน้ำมันเบรกก็นำแรงที่ผลักลูกสูบออกไป เพื่อดันฝักเบรกให้ไปดันกับขอบดรัมเบรกที่หมุนไปกับล้อเพื่อสร้างแรงเฉื่อยให้กับรถ



รูปที่ 2.9 กลไกดรัมเบรก (ที่มา <http://www.weekendhobby.com>)

#### ข้อดี

- 1) ไม่ต้องใช้แรงเหยียบมาก ใช้แรงกดน้อย
- 2) มีกำลังหยุดรถสูง เหมาะกับรถที่มีน้ำหนักเยอะ หรือรถที่ใช้บรรทุกของหนัก
- 3) มีระบบปิดที่มิดชิด ระยะเวลาบำรุงรักษานาน

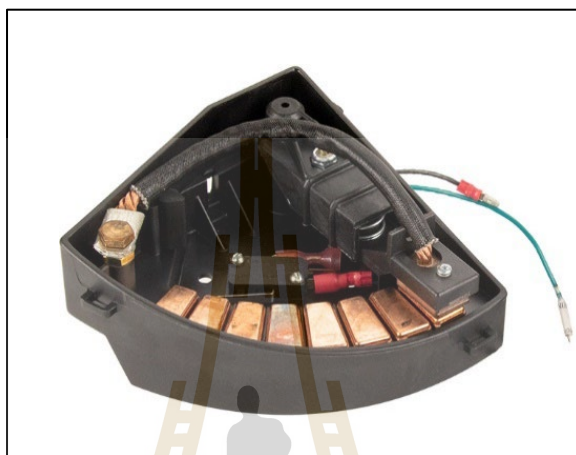
#### ข้อเสีย

- 1) มีความร้อนสะสมสูง
- 2) ไม่ค่อยแม่นยำ เพราะการตอบสนองค่อนข้างช้า
- 3) ระบายน้ำได้ไม่ค่อยดี
- 4) ดูแลรักษายาก เพราะอยู่ในระบบปิด



### 2.3.3 ระบบคันเร่ง (Throttle system)

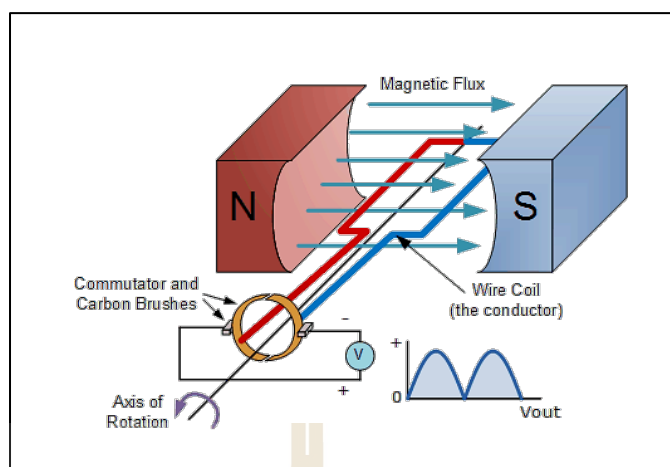
การควบคุมความเร็วใช้ตัวต้านทานที่เป็นขดลวดมาควบคุมความเร็วรถ โดยผ่านการเลือกขนาดความต้านทานจากแป้นคันเร่งหรือเราเรียกว่า “Wiper switch” ระบบนี้ออกแบบง่ายแต่มีความสูญเสียพลังงานสูงในรูปของความร้อน



รูปที่ 2.10 Wiper switch (ที่มา [www.golfcartking.com](http://www.golfcartking.com))

## 2.4 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงจะมีหลักการทำงานโดยวิธีการส่งผ่านกระแสให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กโดยส่วนของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับกระแส (I) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากในรูปทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) และสนามแม่เหล็กจะเกิดจากแท่งแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ 2 ชั้นที่ขึ้นรูปเป็นแบบโค้งยึดติดกับตัวถัง (Stator) ได้พอดี เพื่อที่จะให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ใจกลางของมอเตอร์ได้ โดยวิ่งจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ของขั้วแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งไปบนตัวถังโลหะ กระแสไฟฟ้าในขดลวดที่พันกับขั้วโรเตอร์ (Rotor) ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และต้านกับสนามแม่เหล็กถาวร จึงเกิดเป็นแรงบิด เพื่อที่จะหมุนขั้วโรเตอร์ (Rotor) ให้ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีแรงมากกว่า กระแสก็จะไหลผ่านไปยังขั้วโรเตอร์ โดยผ่านแปรงถ่าน (Brush) ซึ่งจะสัมผัสกับแหวนตัวนำในขั้วโรเตอร์ และแหวนคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เพื่อที่จะทำหน้าที่นำกระแสเข้าขดลวด



รูปที่ 2.11 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรง (ที่มา: <http://xuperb.blogspot.com>)

#### 2.4.1 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

ในการใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการหมุน และทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงนั้นจะต้องมีส่วนของวงจรที่เรียกว่า “วงจรขับมอเตอร์ (Driver)” ในส่วนของวงจรกลับทิศทางของมอเตอร์นั้นสามารถที่จะใช้รีเลย์ต่อวงจรสวิตช์ เพื่อกลับทิศทางของขั้วไฟกระแสตรง หรืออาจใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นวงจรขับกำลัง เช่น ทรานซิสเตอร์ และมอสเฟต เป็นต้น

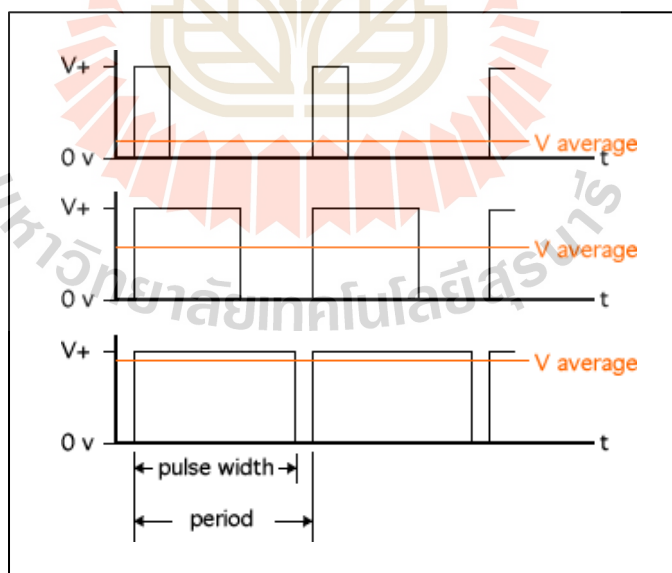
ด้วยเหตุผลเพราะไม่สามารถจะใช้ขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนกระแสไฟที่ขดลวดของรีเลย์โดยตรงได้ เนื่องจากว่ากระแสที่จ่ายออกมาจากขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราจึงต้องมีส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อที่จะทำการขยายกระแสให้เพียงพอในการป้อนให้กับมอสเฟต ส่วนไดโอดนำมาต่อไว้สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในขณะที่เกิดการยุบตัว ซึ่งอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งอาจจะใช้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานทั่วไปเช่นการควบคุมด้วยวิธีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าโดยต่ออนุกรมกับมอเตอร์ หรือใช้วิธีการการควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่การควบคุมในวิธีดังกล่าวถึงแม้ว่าจะควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ได้ แต่ที่ความเร็วต่ำจะส่งผลให้แรงบิดต่ำไปด้วย ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เป็นช่วง ๆ โดยอาศัยกระแสไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ซึ่งเราเรียกว่า “วิธีการของการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation)”

## 2.5 วิธีการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation)

การควบคุมพลังงานที่ส่งออกไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม เช่น ความเร็วรอบของมอเตอร์ ความสว่างของหลอด LED โดยปกติหมายถึงการลดแรงดันที่ส่งออกไปยังมอเตอร์ แต่การลดแรงดันนั้นเป็นแนวทางที่ต้องใช้วงจรที่ซับซ้อนมีความยุ่งยากค่อนข้างมาก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้เทคนิคที่เรียกว่า “Pulse Width Modulation (PWM)” ซึ่งไม่ได้ลดแรงดันหากแต่ใช้หลักการเปิด/ปิดมอเตอร์ด้วยความเร็วสูง ๆ จนผลค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ได้ออกมาเทียบเท่ากับการเปลี่ยนแรงดันโดยตรง

PWM จะสร้างลูกคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ด้วยการกำหนดสัญญาณสูงต่ำ (High-Low) ออกมาโดยกำหนดคาบของสัญญาณ (Period) หลักการสำคัญของ PWM คือ การปรับเปลี่ยนความกว้างของลูกคลื่นในแต่ละคาบ โดยถ้าลูกคลื่นสั้นก็จะทำให้แรงดันเฉลี่ยที่ออกมามีค่าน้อย และถ้าลูกคลื่นยาวแรงดันเฉลี่ยก็จะมีค่ามากขึ้น จากรูปที่ 2.12 V average (เส้นสีส้ม) จะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของลูกคลื่น ซึ่งความกว้างของลูกคลื่นนี้เรียกว่า “Pulse width” หรือ “Duty Cycle” ความกว้างของลูกคลื่นจะต้องน้อยกว่าค่าความยาวคาบเสมอ โดย Duty Cycle จะมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวคาบ เช่น ถ้าคาบเท่ากับ 10 ms และ Duty Cycle = 40% นั้นหมายความว่า  $Pulse\ width = 10 \times 0.4 = 4\ ms$  เป็นต้น



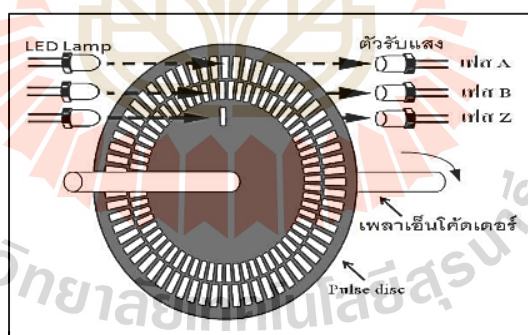
รูปที่ 2.12 ลักษณะคลื่น PWM (ที่มา: <https://learninginventions.org>)

## 2.6 เอ็นโค้ดเดอร์แบบแกนหมุน

เอ็นโค้ดเดอร์แบบแกนหมุน (Digital rotary encoder) คือ เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการเข้ารหัส จากระยะทางจากการหมุนรอบตัวเองและแปลงออกมาเป็นรหัสในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า โดยเราสามารถนำเอารหัสเหล่านี้มาแปลงกลับ เพื่อหาค่าต่าง ๆ ที่เราต้องการได้ ไม่ว่าจะเป็นระยะทางการหมุน องศาการเคลื่อนที่ หรือความเร็วรอบ แล้วนำมาแสดงผลทราบค่าผ่านหน้าจอแสดงผล เช่น ถ้าต้องการวัดระยะทาง เราจะต้องต่อเข้ากับตัวนับจำนวน เพื่อแสดงผลเป็นระยะทาง หรือถ้าต้องการวัดความเร็วรอบ เราจะต้องต่อเข้ากับตัววัดพัลส์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการประยุกต์ใช้เอ็นโค้ดเดอร์นั้นสามารถใช้งานได้หลากหลาย

### 2.6.1 ส่วนประกอบของ Digital rotary encoder ชนิด Incremental แบบ Optical

- 1) เพลา (Shaft) ใช้สำหรับต่อเข้ากับวัตถุที่หมุนเช่น มอเตอร์
- 2) แผ่นดิสก์ (Code หรือ Pulse disc) จะเป็นแผ่นที่มีแตรีกหรือร่องเล็ก ๆ มีทั้งส่วนที่โปร่งแสงและทึบแสง เพื่อให้แสงอินฟราเรดลอดผ่านได้
- 3) แหล่งแสง (Light source) เป็นไป LED คุณภาพสูง
- 4) ตัวรับแสง (Photodetector หรือ Photodiode) ใช้รับแสงจาก LED เพื่อแปลงไปเป็นรหัสข้อมูล



รูปที่ 2.13 การทำงานของ Rotary encoder (ที่มา: <http://www.tic.co.th>)

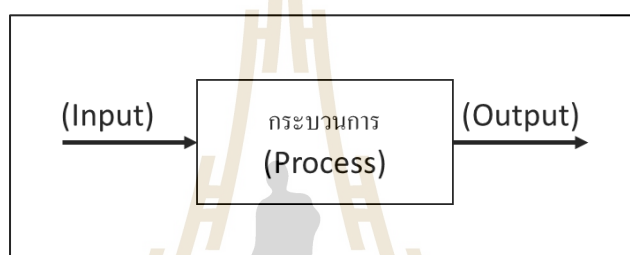
## 2.7 ระบบควบคุม (Control system)

ระบบควบคุมคือกระบวนการ (Process) ที่ใช้ในการควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการที่เราต้องการควบคุม ตัวอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศจะมีกระบวนการที่ใช้ปรับความเย็นของเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องคงที่ในช่วงที่ผู้ใช้ต้องการ การควบคุมการขับเคลื่อนยานพาหนะ เช่น รถยนต์ ก็ถือเป็นการควบคุมชนิดหนึ่ง โดยผู้ขับขี่เป็นผู้ควบคุม

ทิศทางและความเร็ว ซึ่งระบบควบคุมประเภทที่ต้องมีคนเข้ามาเกี่ยวข้องนี้ถือว่าเป็นระบบควบคุมไม่อัตโนมัติ (Manual control) แต่ทฤษฎีระบบควบคุมจะครอบคลุมเฉพาะการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) เท่านั้น เช่น ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Cruise control)

### 2.7.1 ระบบควบคุมวงเปิด (Open loop control)

ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system) เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีนำเอาผลลัพธ์การป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุตจึงง่ายต่อการสร้างและประหยัด แต่ค่าเอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบ



รูปที่ 2.14 Block diagram ระบบควบคุมแบบเปิด

### 2.7.2 ระบบควบคุมวงปิด (Close loop control)

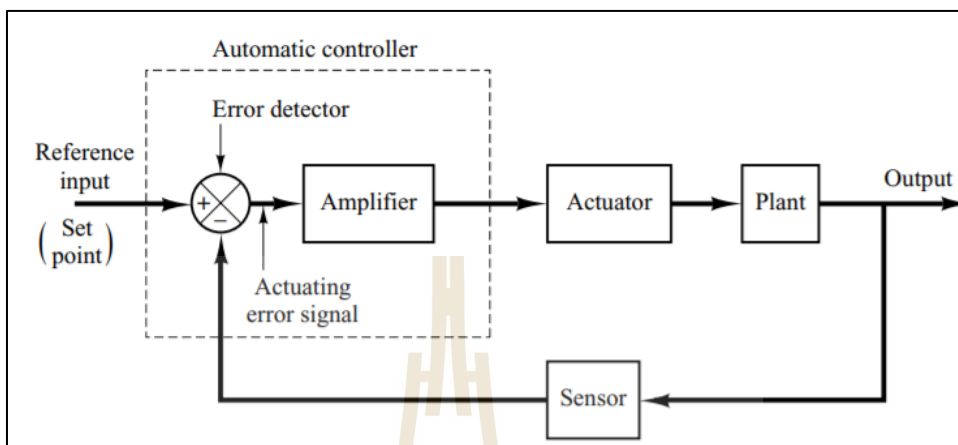
Katsuhiko (2012) ได้เขียนเกี่ยวกับระบบควบคุมวงปิด (Closed loop control system) หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control systems) ใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าที่ระบบสามารถทำได้ (Output) กับค่าอ้างอิงที่ใส่ให้ระบบ (Input) ความแตกต่างนี้ก็คือความผิดพลาดของระบบ (System error) ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หรือเท่ากับมากที่สุด จะถูกประมวลผลด้วยตัวควบคุมและทำการส่งสัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์ในระบบ ซึ่งในระบบควบคุมวงปิดนี้ ประกอบไปด้วย

1) ตัวควบคุม (Controller) มีหน้าที่รับสัญญาณ (Input) และสัญญาณป้อนกลับจาก Sensor เพื่อประมวลผลสัญญาณที่จะถูกส่งให้ตัวกระตุ้นของระบบ

2) ตัวกระตุ้น (Actuator) มีหน้าที่กระตุ้นให้ระบบทำงาน ใช้ควบคุมกลไก โดยต้องใช้พลังงานป้อนให้

3) พลานต์ (Plant) หมายถึง ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ ชุดของส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรที่ทำงานร่วมกัน วัตถุทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุม เช่น เครื่องมือทางกล เตาเผาความร้อน เตาปฏิกรณ์เคมี หรือยานอวกาศ เป็นต้น

4) เซ็นเซอร์ (Sensor) มีหน้าที่ตรวจวัดการทำงานของ Plant (Output) และส่งข้อมูลให้กับ Controller



รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบควบคุมวงปิด (Katsuhiko, 2012)

### 2.7.3 การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller)

PID controller (Proportional-Integral-Derivative controller) เป็นการควบคุมแบบวงปิดที่นำเอาค่าผิดพลาดจากระบบ (Error) คำนวณจากค่าเริ่มต้น (Setpoint) ลบด้วยค่าการตอบสนองของระบบ (Output) มาทำการชดเชยโดยมีตัวแปร P, I และ D ในการปรับค่าสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบ โดยที่สามารถออกแบบผลการตอบสนองให้เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าการพุ่งเกิน (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation)

สัดส่วน (Proportional term, P) คือ อัตราขยายที่เกิดจากการนำค่าผิดพลาดของระบบมาคูณด้วยค่าคงที่  $K_p$

$$P = K_p e(t) \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

$K_p$  คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

$e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด ณ เวลา t

ปริพันธ์ (Integral term, I) คือ ค่าที่นำผลรวมของความผิดพลาดมาคูณกับอัตราขยาย

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.2)$$

โดยที่ I คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์  
 $K_i$  คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้  
 $e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด ณ เวลา t

อนุพันธ์ (Derivative term, D) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการหรือ ความชันของความผิดพลาดของระบบทุก ๆ เวลา และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์  $K_d$

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.3)$$

โดยที่ D คือ สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์  
 $K_d$  คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้  
 $e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด ณ เวลา t

สัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID เมื่อนำสัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์จะได้สัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID แทนด้วย  $u(t)$

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.1 ผลการตอบสนองของการปรับค่าอัตราขยาย PID ต่อระบบ

ตัวแปร	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	โอเวอร์ชูต (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Settling time)	ความผิดพลาด สถานะคงตัว (Steady state error)	เสถียรภาพ
$K_p$	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด	ลด
$K_i$	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมี นัยสำคัญ	ลด
$K_d$	ลดลง เล็กน้อย	ลดลง เล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้นถ้ามี ค่าน้อย

#### 2.7.4 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เป็นการนำคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายการเกิดผลกระทบจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ เพื่อให้สามารถคาดการณ์พฤติกรรมของระบบที่เราสนใจนั้นได้ ซึ่งการที่จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จำเป็นจะต้องรู้ทุก ๆ ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบอย่างไรบ้าง ในงานวิศวกรรมส่วนประกอบของระบบซับซ้อนและบางตัวแปรไม่สามารถรู้ได้ System identification จึงเป็นเครื่องมือเข้ามาช่วยในการหาแบบจำลองนี้ โดยจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่าง output กับ input ใน s โดเมนจากการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) เมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรทุกตัวเป็นศูนย์นั่นคือ

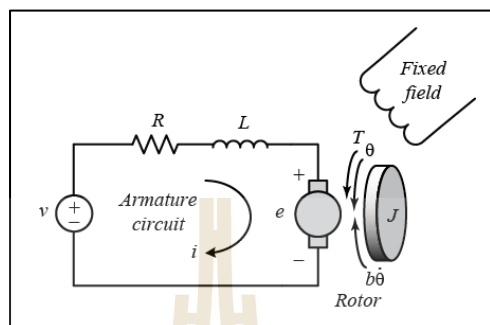
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.5)$$

โดยที่  $G(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน  
 $Y(s)$  คือ ผลการตอบสนอง (Output)  
 $X(s)$  คือ ค่าที่ใส่เข้าไป (Input)

การแปลงลาปลาซ เป็นพื้นฐานที่ต้องใช้ในการสร้าง โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เราต้องการศึกษาในโดเมนความถี่ (Frequency domain) เนื่องจากระบบที่แสดงด้วยสมการ



อนุพันธ์ในสมัยก่อนนั้นยากในการจำลองและวิเคราะห์ ดังนั้นจึงมีการนำเอาการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเป็นเครื่องมือในการแปลงสมการใน โดเมนเวลาเป็นสมการในโดเมนความถี่หรือ s domain



รูปที่ 2.16 ตัวแปรทางกายภาพของมอเตอร์กระแสตรง (ที่มา: <http://ctms.engin.umich.edu>)

โดยที่	J	คือ Moment of inertia of the rotor ( $\text{kg.m}^2$ )
	b	คือ Motor viscous friction constant ( $\text{N.m.s}$ )
	$K_b$	คือ Electromotive force constant ( $\text{V/rad/sec}$ )
	$K_t$	คือ Motor torque constant ( $\text{N.m/Amp}$ )
	R	คือ Electric resistance (Ohm)
	L	คือ Electric inductance (H)
	$\theta$	คือ Angle (rad)
	$\dot{\theta}$	คือ Rotational speed (rad/s)

จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton's และจากกฎของ Kirchhoff's สามารถเขียนสมการได้  
ดังนี้

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_i \quad (2.5)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_b \dot{\theta} \quad (2.6)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซกับสมการที่ 6 และ 7 ให้อยู่ในรูปเทอมของ s domain

$$s(Js + b)\theta(s) = KI(s) \quad (2.7)$$

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - Ks\theta(s) \quad (2.8)$$

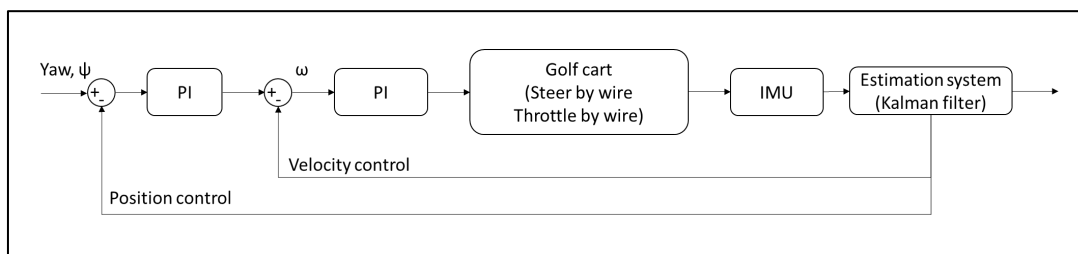
เมื่อจัดรูปสมการโดยการกำจัดเทอมของ  $I(s)$  จากสมการที่ 8 และ 9 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบวงเปิดมอเตอร์กระแสตรง เมื่อพิจารณาความเร็วในการหมุนของมอเตอร์เป็น output และการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาเมเจอร์เป็น input

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \left[ \frac{\text{rad/s}}{V} \right] \quad (2.9)$$

## 2.8 อุปกรณ์ควบคุมการบินอัตโนมัติ

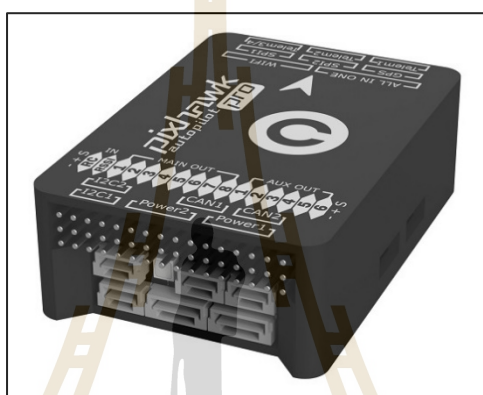
### 2.8.1 Pixhawk

Pixhawk เป็นบอร์ดควบคุมยานพาหนะพื้นฐานที่เปิดให้นักพัฒนาสามารถแก้ไขให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีผู้ผลิตได้พัฒนาบอร์ดขึ้นมาหลายรุ่น Pixhawk ถูกพัฒนาขึ้นโดย Lorenz Meier จากมหาวิทยาลัย ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich) ในปี 2009 บอร์ดที่เลือกใช้นั้นมีลักษณะ ดังรูปที่ 2.16 มีราคาที่ต้องจ่ายได้ โดยด้านในบอร์ดจะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ IMU (Inertial Measurement Units (IMU) สำหรับการวัดความเร็วและเข็มทิศสำหรับตรวจจับลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการใช้ควบคุมโดรน โดยสามารถปรับแต่งการควบคุมของบอร์ดผ่านซอฟต์แวร์ QGround control



รูปที่ 2.17 โค้ดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบควบคุมระบบของ Pixhawk

โดยในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของรถจากรูปที่ 2.15 Pixhawk จะใช้ IMU ร่วมกับ Kalman filter ที่ใช้ในการทำนาย-แก้ไข ประเมินการลดลงที่เหมาะสมของความแปรปรวนรบกวนผิดพลาด (Predictor-corrector type estimator optimally minimizing the estimated error covariance) คือ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ร่วมกับสัญญาณ Input ที่ป้อนเข้าไปในระบบ มาประมาณสถานะของระบบ และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด เพื่อนำไปคำนวณหาค่าทางสถิติของความคลาดเคลื่อน และปรับแต่งการประมาณสถานะ เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด



รูปที่ 2.18 Pixhawk 3 Pro ผลิตโดย Drotek® and PX4

คุณสมบัติและส่วนประกอบภายใน

- Microcontroller: STM32F469; Flash size is 2MiB, RAM size is 384KiB
- ICM-20608-G gyro / accelerometer
- MPU-9250 gyro / accelerometer / magnetometer
- LIS3MDL compass
- Sensors connected via two SPI buses (one high rate and one low-noise bus)
- Two I2C buses Two CAN buses
- Voltage / battery readings from two power modules
- FrSky® Inverter
- 8 Main + 6 AUX PWM outputs (Separate IO chip, PX4IO)
- microSD (logging)
- S.BUS / Spektrum / SUMD / PPM input

### 2.8.2 Sirius RTK GNSS Rover (M8P)

โมดูล RTK Rover station ถูกใช้เพื่อติดต่อสื่อสารบนเครือข่ายดาวเทียม Galileo, Beidou, Glonass และ GPS เพื่อให้ได้พิกัดตำแหน่งอย่างแม่นยำ โดยใช้โปรโตคอล MAVLink การติดตั้งสามารถเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับ Pixhawk pro3 ได้ โดยสามารถให้ความแม่นยำสูงสุด 0.025 เมตร เมื่อใช้ร่วมกับ SIRIUS RTK GNSS Base (M8P) ที่เป็นสถานีภาคพื้นดินที่ทำหน้าที่รับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ได้ค่าพิกัดการวัดทันที (Real-time kinematic : RTK) ณ เวลาทำการรังวัดซึ่งมีตำแหน่งคงที่โดยมีเครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง เครื่องหนึ่งจะถูกวางไว้ในตำแหน่งที่รู้ค่าแน่นอนตลอดเวลาเป็นสถานีหลัก (Base station) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองคือสถานีเคลื่อนที่ (Rover station) จะนำไปวางไว้บนตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัด



รูปที่ 2.19 Sirius RTK GNSS Rover (M8P)

### 2.8.3 รีโมตควบคุมและตัวรับสัญญาณ (Remote and receiver)

รีโมตควบคุมและตัวรับสัญญาณเป็นคลื่นความถี่สูง 2.4 GHz ทำให้สามารถนำรีโมตคอนโทรล และตัวรับสัญญาณหลาย ๆ ตัวมาใช้ในที่เดียวกันได้ โดยคลื่นไม่ชนกันในรูปแบบรีโมตคอนโทรลแบบ 8 ช่องสัญญาณ โดยตัวรับสัญญาณสามารถส่งคลื่น analog PWM ที่มีความกว้างของสัญญาณช่วง 19-20 ms และส่งสัญญาณได้ไกลเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางสูง ๆ รบกวน



รูปที่ 2.20 รีโมทควบคุมใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz (ที่มา: <https://www.banggood.com>)

#### 2.8.4 เซนเซอร์ชนิดใช้แสงประเภทตรวจจับโดยตรง (Diffuse-reflective optical sensor)

เซนเซอร์ชนิดใช้แสงประเภทตรวจจับโดยตรง (Diffuse-reflective optical sensor) เซนเซอร์ชนิดใช้แสง (Optical sensor/Photo sensor) ประเภทนี้ตัวส่งแสงและตัวรับแสงติดตั้งรวมอยู่ภายในตัวเดียวกัน ตรวจจับโดยการสะท้อนลำแสงโดยตรงกับตัววัตถุ และใช้วัตถุนั้นเป็นตัวสะท้อนลำแสงกลับมายังตัวรับแสงโดยไม่ต้องมีการปรับแต่งทิศทางลำแสง ระยะการตรวจจับใกล้ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่น ๆ มีระยะการตรวจจับประมาณ 1 เมตร เซนเซอร์ประเภทนี้นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสะดวกและง่ายในการติดตั้ง ใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย ราคาถูก ไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นเพิ่มเติมเพราะมีทั้งตัวส่งและตัวรับอยู่ในตัวเดียวกันสามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวด้านหรือดูดกลืนแสงและวัตถุที่โปร่งแสง เหมาะสำหรับการตรวจจับวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นมันวาวและทึบแสง ระยะการตรวจจับขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุที่ต้องการตรวจจับ เช่น สี และความเรียบมันของวัตถุ โดยระยะการตรวจจับจะลดลงอย่างมากถ้าเป็นวัตถุสีดำ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ BANNER Q20NDXL Photoelectric Sensor

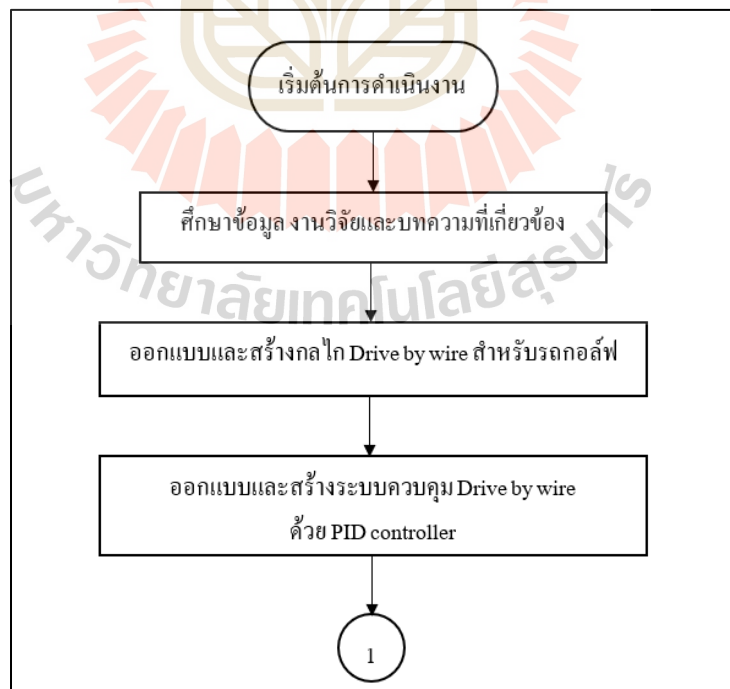
Sensing Beam	Infrared LED
Max Sensing Range (m)	1.5
Supply Voltage	10-30 V dc
Output Type	NPN
Operation	Light/Dark Operate
Output response time (ms)	0.8
Delay at Power-up (ms)	100
Repeatability ( $\mu$ s)	155

## บทที่ 3

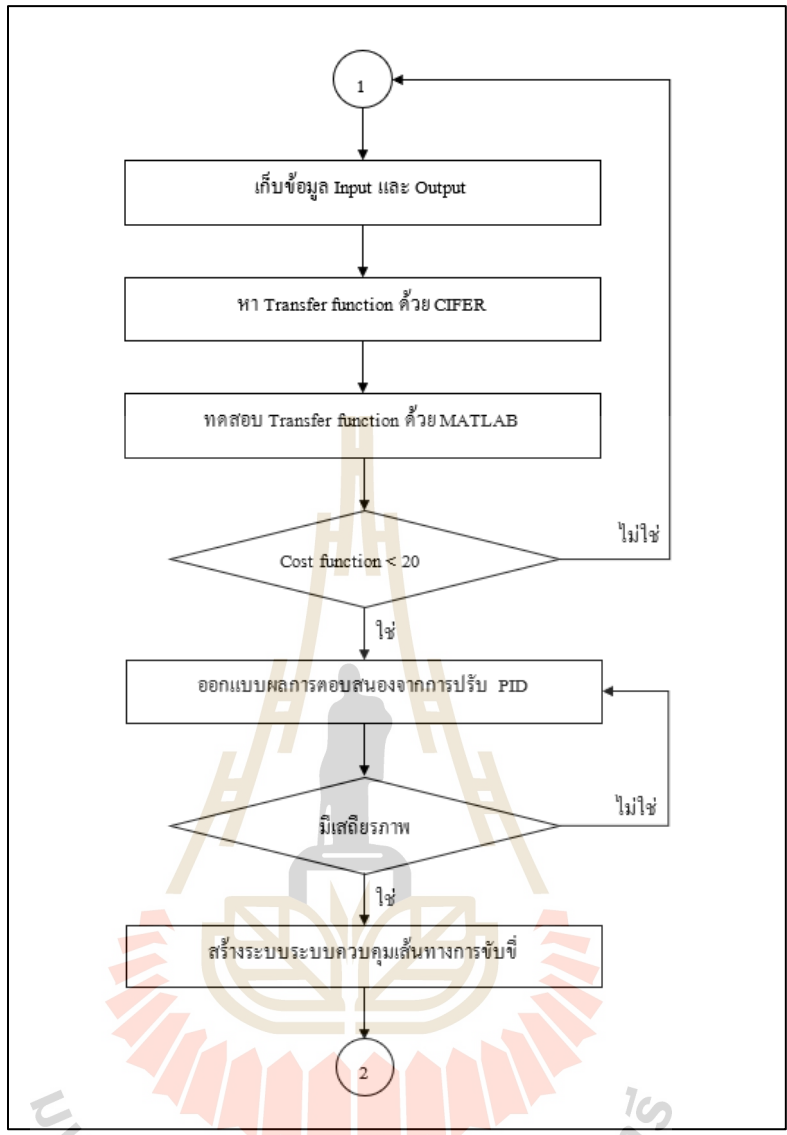
### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

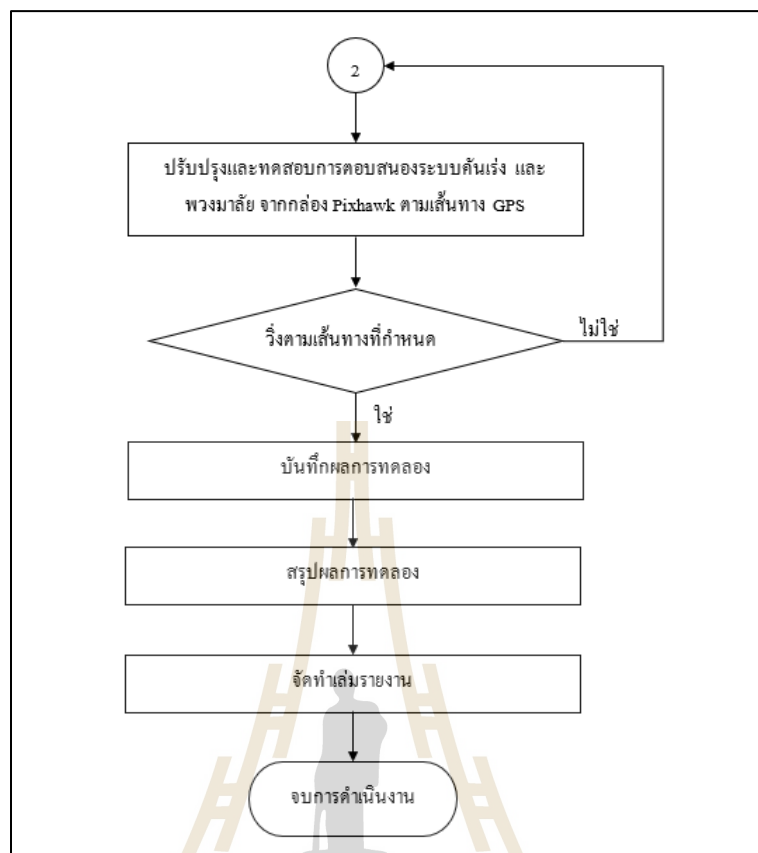
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาารถกอล์ฟให้สามารถควบคุมด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า โดยได้ปรับปรุงกลไกดั้งเดิมของรถให้เป็นแบบ Drive by wire ทั้งนี้ต้องทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการควบคุมตำแหน่งการทำงานของกลไกการบังคับเลี้ยว กลไกคันเร่ง และเบรก ให้สามารถทำแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ในการทดสอบผลการตอบสนองก่อนที่จะปรับปรุงแก้ไขผลการตอบสนองด้วยวิธีการควบคุมแบบวงปิดด้วย PID controller ปรับแต่งค่าอัตราขยายของแต่ละระบบ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่มีเสถียรภาพและลดความผิดพลาดของระบบ ต่อยอดไปยังการใช้บอร์ด Pixhawk ในการวัดพลาศาสตร์ของรถและรับส่งสัญญาณ GPS เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งและพิกัดของรถในการควบคุมความเร็วและทิศทางของรถ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (ต่อ)



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (ต่อ)

### 3.2 การออกแบบและสร้างกลไก Drive by wire

Drive by wire เป็นการใช้ตัวกระตุ้น (Actuator) เข้าไปช่วยควบคุมระบบแทนที่ผู้ขับขี่ ซึ่งสามารถสั่งการได้จากสัญญาณทางไฟฟ้า จึงได้เลือกชนิดของตัวกระตุ้นเป็น มอเตอร์กระแสตรง สำหรับควบคุมระบบบังคับเลี้ยว คันเร่งและ เบรก และทำการป้อนกลับตำแหน่งด้วย Encoder โดยมีข้อกำหนดให้รถกอล์ฟยังสามารถขับได้ด้วยผู้ขับขี่ กรณีที่ไม่สามารถบังคับระบบ Drive by wire





รูปที่ 3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 24V



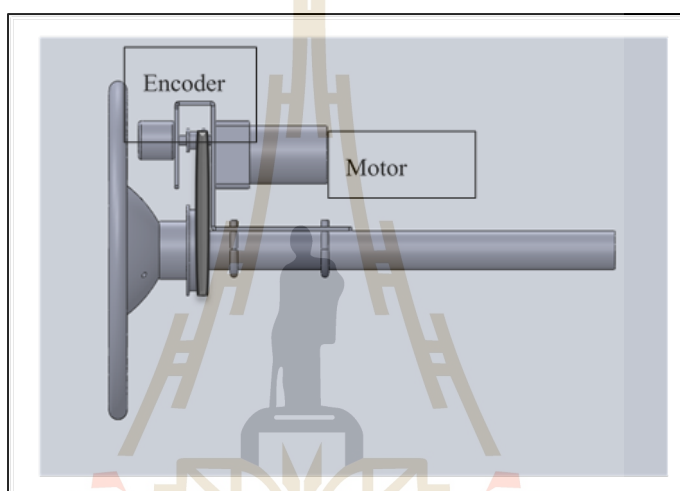
รูปที่ 3.3 Incremental rotary encoder

### 3.2.1 กลไกระบบควบคุมบังคับด้วยเส้น (Steer by wire)

การควบคุมระบบบังคับด้วยเส้นได้ออกแบบการส่งกำลังด้วยสายพานและรอกระหว่างแกนเพลามอเตอร์ กับเพลาลงของพวงมาลัยจึงได้ทำการกลึงข้อต่อแกนเพลาดังรูปที่ 3.4 โดยที่แกนมอเตอร์ 24V 500 rpm จะเชื่อมต่อเข้ากับ Encoder เพื่ออ่านตำแหน่งการหมุนรอกตัวขับมีจำนวนฟัน 15 ฟัน และตัวตามมี 60 ฟัน เป็นการทดอัตราส่วน 1:4 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ข้อต่อพวงมาลัยกับรอกตัวตามขนาด 60 ฟัน



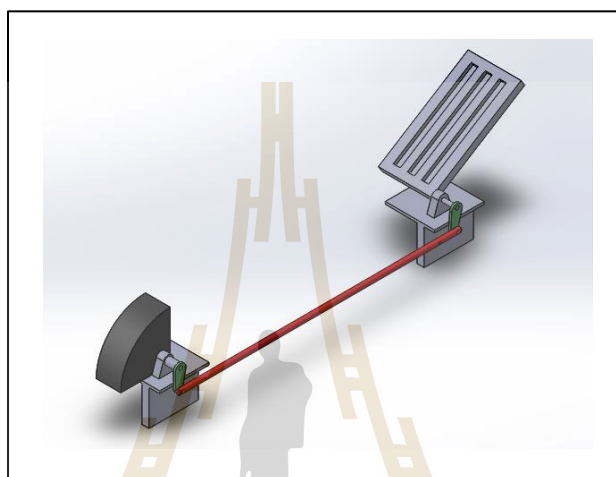
รูปที่ 3.5 การออกแบบการติดตั้งด้วยโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 3.6 การติดตั้งมอเตอร์ควบคุมระบบบังคับลิ้นว ตันแบบที่ 1

### 3.2.2 กลไกระบบควบคุมคันเร่ง (Throttle by wire)

กลไกดั้งเดิมของรถกอล์ฟนั้นเป็นการส่งกำลังจากแป้นเหยียบไปยัง Speed switch ดังรูปที่ 3.6 เพื่อให้ยังสามารถใช้กลไกดั้งเดิมกรณีไม่สามารถใช้ Drive by wire ได้ จึงเลือกใช้กลไกต่อโยง (Linkage) เข้ามาเชื่อมต่อมอเตอร์ 24V 200 rpm กับแป้นเหยียบ ดังรูปที่ 3.7 ตรวจสอบตำแหน่งของคันเร่งโดยการติด Encoder ที่ Speed switch



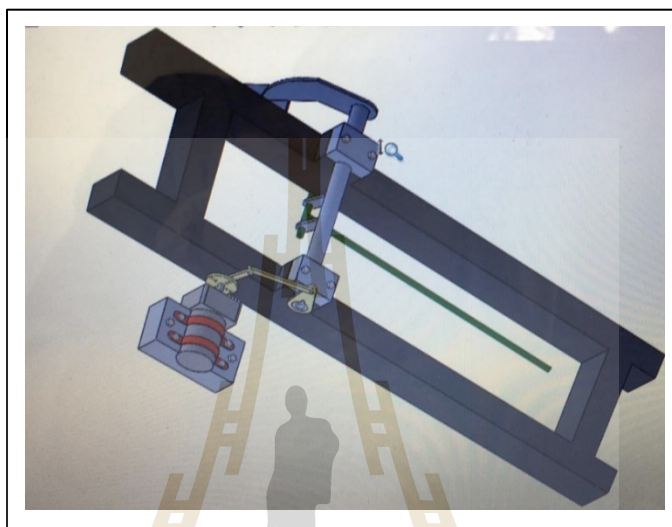
รูปที่ 3.7 แบบจำลองกลไกดั้งเดิมของรถกอล์ฟ



รูปที่ 3.8 กลไกต่อโยงติดตั้งเข้ากับแป้นเหยียบและมอเตอร์รับรถกอล์ฟ

### 3.2.3 กลไกระบบควบคุมเบรก (Brake by wire)

ระบบเบรกดั้งเดิมของรถกอล์ฟใช้แรงจากกลไกการหมุนของแป้นเบรกเพื่อดึงสลิงที่ถูกเชื่อมต่อกับครัมเบรก 2 ล้อหลัง ได้เพิ่มมอเตอร์ขนาด 24V 100 rpm และ Encoder เพื่อใช้ควบคุมระบบเบรกผ่านสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยการเชื่อมต่อแบบ 4 Bar linkage เข้ากับระบบเบรกแบบดั้งเดิม



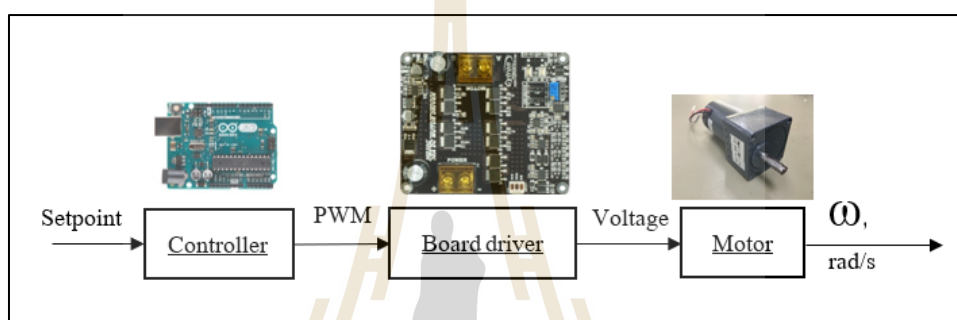
รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบเบรกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 3.10 การติดตั้งกลไกระบบควบคุมเบรกเข้ากับรถกอล์ฟ

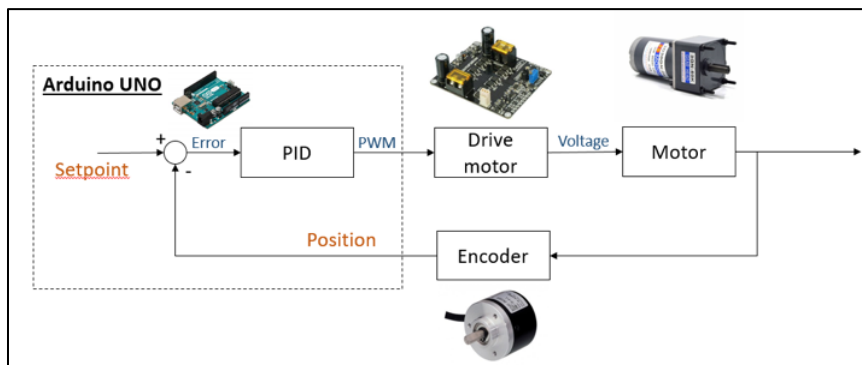
### 3.3 การออกแบบวงจรควบคุมกลไก (Drive by wire Control)

เมื่อทำการสร้างและติดตั้งกลไกควบคุมทั้งสามระบบเรียบร้อยแล้ว จำเป็นจะต้องมีวงจรไฟฟ้าสำหรับใช้ควบคุม โดยมีบอร์ด Microcontroller Arduino เป็นตัวสั่งการ ซึ่งข้อจำกัดของบอร์ด Arduino ไม่สามารถส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงพอที่จะขับมอเตอร์ที่ 24 โวลต์ โดยสามารถจ่ายได้สูงสุด 5 โวลต์ จึงจำเป็นต้องมีบอร์ดขยายแรงดัน โดยที่จะควบคุมโดยสัญญาณ analog PWM ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 255 โดยเลือกใช้บอร์ด Cytron รุ่น MD 30C สามารถทนกระแสไฟกระชากจากมอเตอร์ได้สูงสุด 30 แอมป์ เพื่อป้องกันการเสียหายไปยัง Arduino

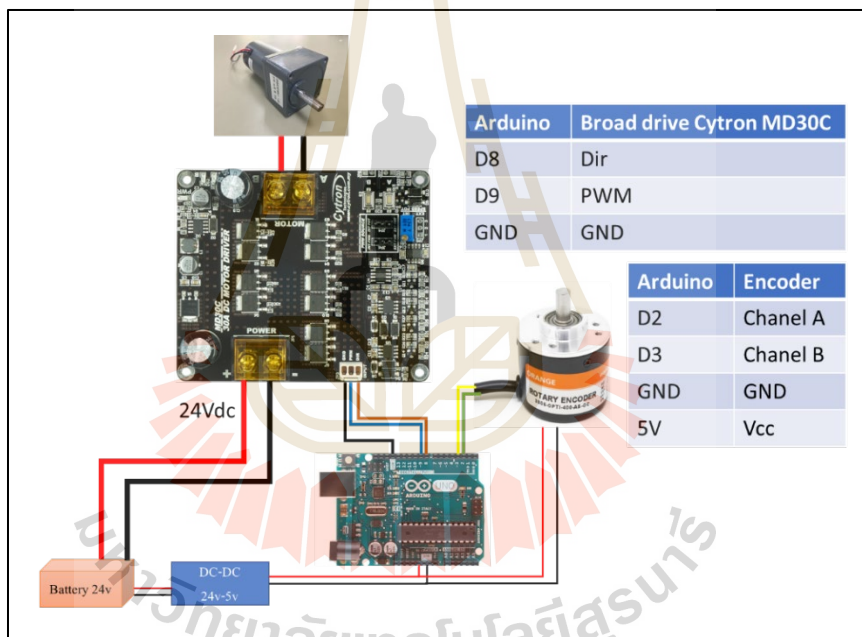


รูปที่ 3.11 แผนภาพการควบคุมมอเตอร์แบบวงเปิด

จากรูปที่ 3.11 เป็นการควบคุมแบบวงเปิดการควบคุมมอเตอร์สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง โดยความเร็วรอบจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไป ผลของการตอบสนองจะมีลักษณะเป็นแบบ First order system เพื่อให้สามารถควบคุมตำแหน่งของการหมุนมอเตอร์จะต้องใช้การควบคุมแบบวงปิดที่ต้องใช้ Encoder เพื่อเข้ามาเป็นตัวตรวจจับตำแหน่งและป้อนกลับให้กับ Arduino โดยแต่ละระบบของ Drive by wire จะใช้ชุดควบคุมมอเตอร์แบบวงปิดต่อละระบบละ 1 ชุด ในการควบคุมการบังคับเลี้ยว การเร่ง และเบรก โดยมีแผนภาพการควบคุม ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์แบบวงปิด



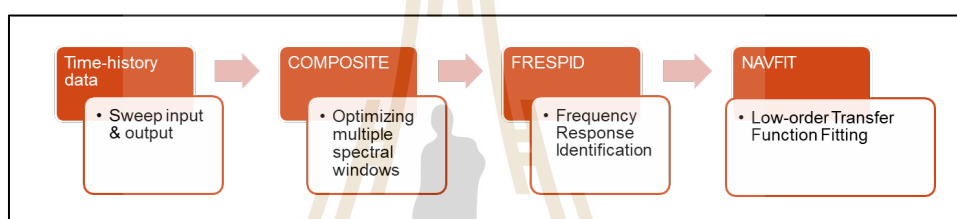
รูปที่ 3.13 วิธีการต่อวงจรสำหรับระบบควบคุมมอเตอร์แบบวงปิด

### 3.3.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมพวงมาลัย (System identification)

ในการจะออกแบบผลการตอบสนองของระบบจะต้องทราบถึงลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์แต่ละตัวเช่น มอเตอร์ จะมีตัวแปรของ Moment of inertia of the rotor, Motor viscous friction constant, Motor torque constant เป็นต้น ถ้าทางผู้ผลิตมีเอกสารระบุถึงตัวแปรเหล่านี้มาให้เราสามารถค้นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการใช้ Newton's law และ Kirchhoff's law

มอเตอร์ที่เลือกใช้ไม่มีเอกสารในการบอกคุณสมบัติของมอเตอร์ จึงเลือกใช้วิธีการทดสอบมอเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้นั้นไปทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

Watcharapol et al. (2017) ได้ทำการนำเสนอวิธีการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการตอบสนองของจลนศาสตร์ของ UAV ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองจากการที่ทดลองให้ Input เข้าไปในระบบเป็นแบบ Sweep ที่มีความถี่ต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 0.4-6 Hz และทำการเก็บข้อมูลผลการตอบสนอง Output เพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยใช้ โปรแกรม CIPHER สร้างผลการตอบสนองเชิงความถี่ และคัดเลือกเฉพาะช่วงความถี่ที่สนใจด้วยเครื่องมือ FRESPID ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยัง NAVFIT เพื่อหา Low-order Transfer Function Fitting ในการหา Transfer function เพื่อนำไปทดสอบแบบจำลอง โดยสามารถดูขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 3.14



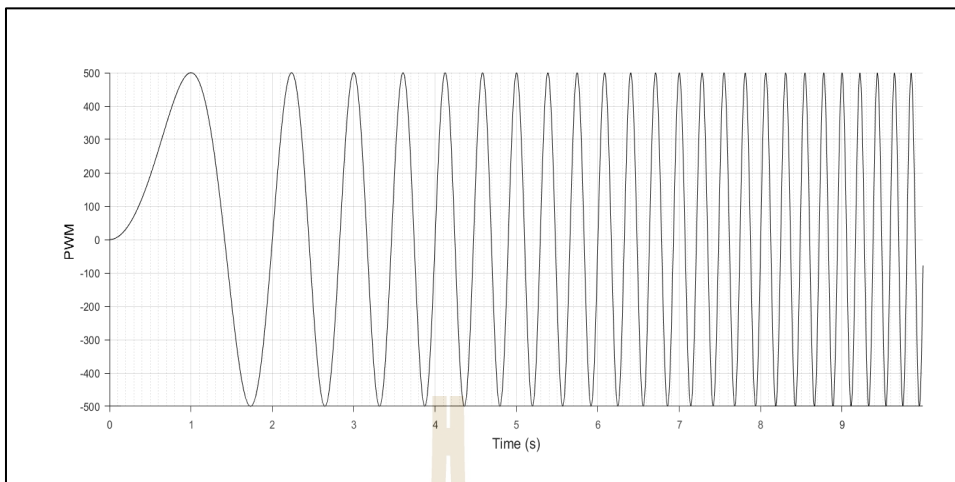
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม CIPHER

**Time-history data** ทำการสร้าง Input (PWM) สำหรับทดสอบระบบโดยใช้รูปแบบ Sweep input โดยใช้สมการที่ 6 ในการสร้างสัญญาณใช้ความถี่ระหว่าง 0.4-5 Hz ภายในเวลา 10 วินาที

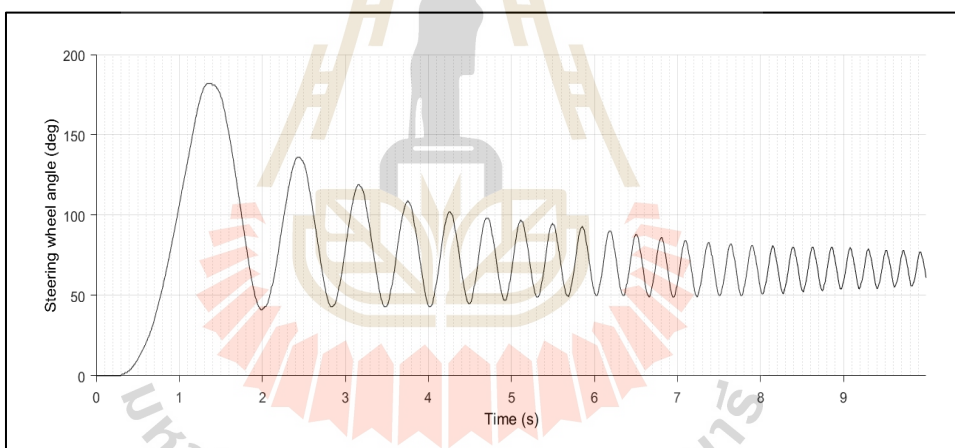
$$k = \frac{f_1 - f_0}{T} \quad (3.1)$$

$$x(t) = \sin[2\pi(f_0 t + 0.5kt^2)] \quad (3.2)$$

เมื่อ  $f_1$  เป็น ความถี่สุดท้าย  
 $f_0$  เป็น ความถี่เริ่มต้น  
 $T$  เป็น ช่วงเวลาระหว่างความถี่  $f_0$  ถึง  $f_1$



รูปที่ 3.15 สัญญาณ Input (PWM) แบบ Sweep สำหรับทดสอบระบบ



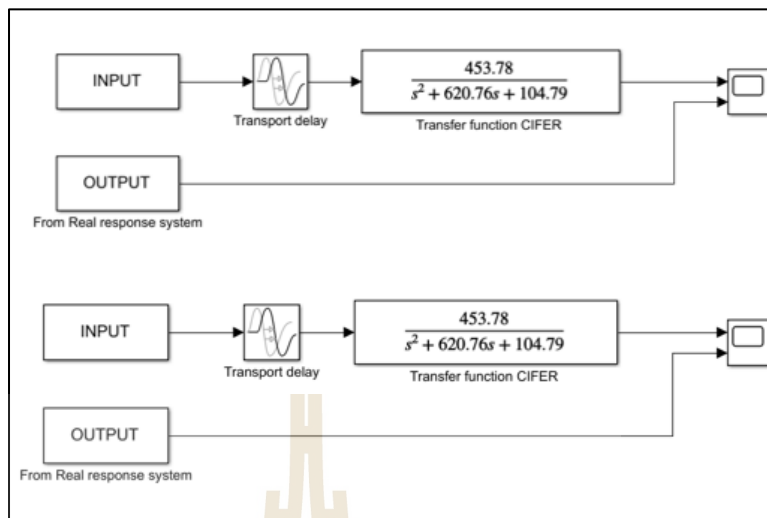
รูปที่ 3.16 สัญญาณ Output (degree) แบบ Sweep สำหรับทดสอบระบบ

**COMPOSITE** เป็นการหาค่าจุดที่เหมาะสมโดยการใช้วิธีการ Quasi-Newton-Raphson

### 3.3.2 Model validation

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของ Transfer function จะต้องทดสอบโดยการป้อน Input ให้กับระบบจริงและเก็บข้อมูลของผลการตอบสนอง Output และนำมาทำการเปรียบเทียบค่าจาก ที่จำลองระบบได้จาก MATLAB Simulink โดยนำเสนอผลการเปรียบเทียบในบทที่ 4

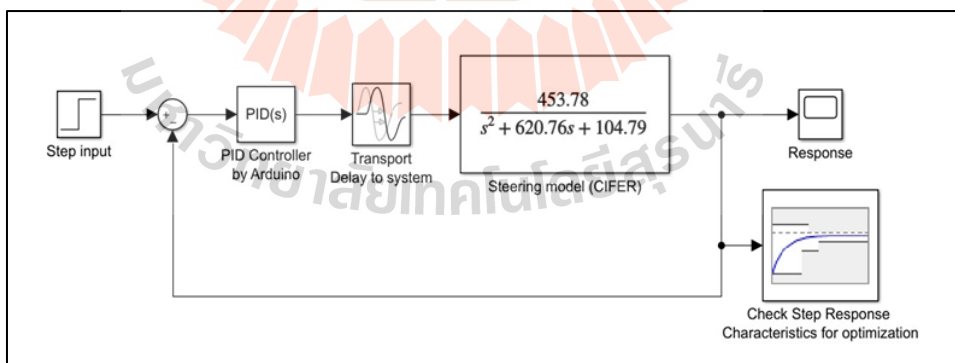




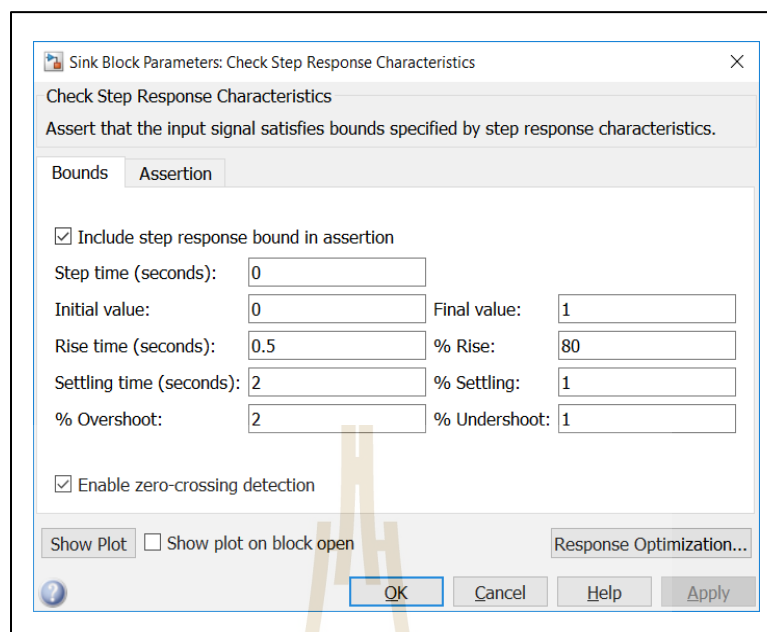
รูปที่ 3.17 Block diagram เปรียบเทียบแบบจำลอง โดย Simulink จาก Input ตัวเดียวกัน

### 3.3.3 การใช้ MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ PID controller

เมื่อทำการตรวจสอบ Transfer function แล้วเพื่อปรับปรุงผลการตอบสนองให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องใช้ตัวชดเชย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวชดเชยชนิด PID และการใช้ Response optimization tool โดยจะต้องกำหนดขอบเขตสำหรับผลการตอบสนองที่ต้องการ



รูปที่ 3.18 Block diagram close loop control steering system



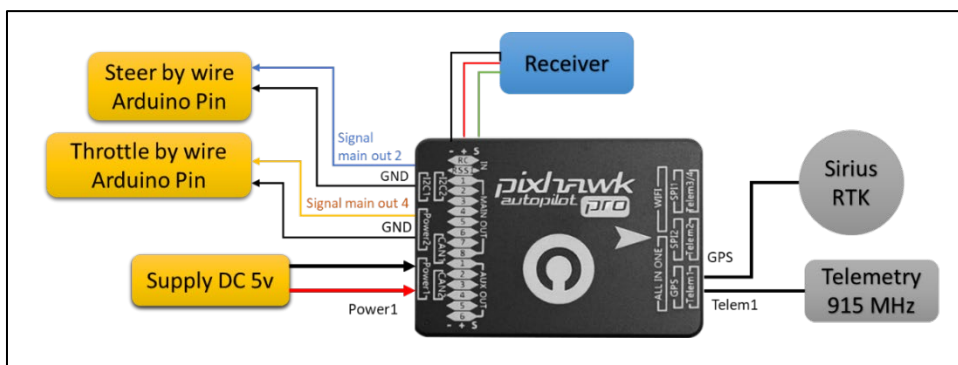
รูปที่ 3.19 เงื่อนไขสำหรับผลลัพธ์การตอบสนองของระบบ

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการกำหนดขอบเขตอัตราขยาย PID

Gain	Initial condition	Min	Max
$K_p$	0.5	0.5	30
$K_i$	0	0	1
$K_d$	0	0	1

### 3.4 การสร้างระบบนำทางด้วย GPS

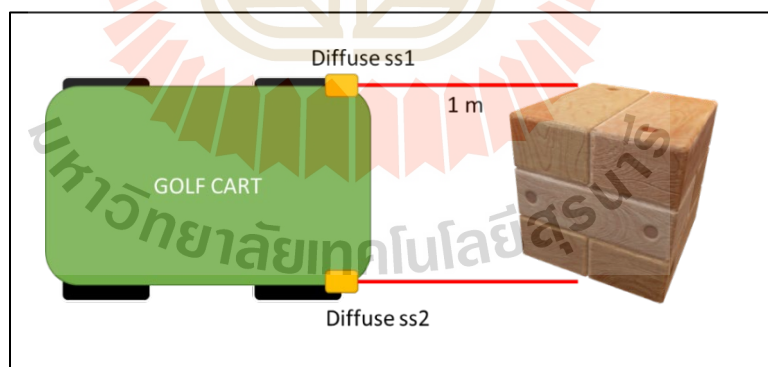
Pixhawk สามารถทำการอัปเดต Firmware PX4 (Version 1.6.5) และเลือกใช้ Air-Frame Rover (Traxxas Stampede vx1 2wd) ในการใช้งานบังคับระบบ Steer by wire และ Throttle by wire ในการเชื่อมต่อเข้ากับ Arduino UNO จะรับสัญญาณ PWM จาก Pixhawk ผ่านช่องสัญญาณ Main out 2 และ Main out 4 โดย Pixhawk จะเป็นบอร์ดควบคุมหลักในการเดินรถอัตโนมัติ โดยกำหนดพิกัดผ่านทาง GPS



รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อ Pixhawk กับ โมดูลต่าง ๆ

### 3.5 การสร้างระบบเบรกฉุกเฉิน

ในการตรวจสอบวัตถุที่ตัดผ่านหน้ารถหรือป้องกันการชนจะต้องใช้เซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำและระยะการตรวจจับที่สูง โดยเซ็นเซอร์นั้นจะต้องตรวจสอบการมีอยู่ของวัตถุได้อย่างทันทีจึงได้เลือกใช้เซ็นเซอร์แสงแบบสะท้อนกลับ โดยใช้คลื่นแสงในช่วง Infrared สามารถตรวจจับวัตถุได้ทุกประเภท มีระยะการตรวจจับสูงสุดที่ 1.2 เมตร โดยวัตถุจะต้องสูงอย่างน้อย 50 เซนติเมตรถึงจะสามารถตรวจจับได้ โดยเซ็นเซอร์จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบควบคุมเบรก



รูปที่ 3.21 ลักษณะการตรวจจับวัตถุด้วยเซ็นเซอร์



รูปที่ 3.22 การติดตั้งเซ็นเซอร์แสงที่ด้านข้างตัวรถ



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

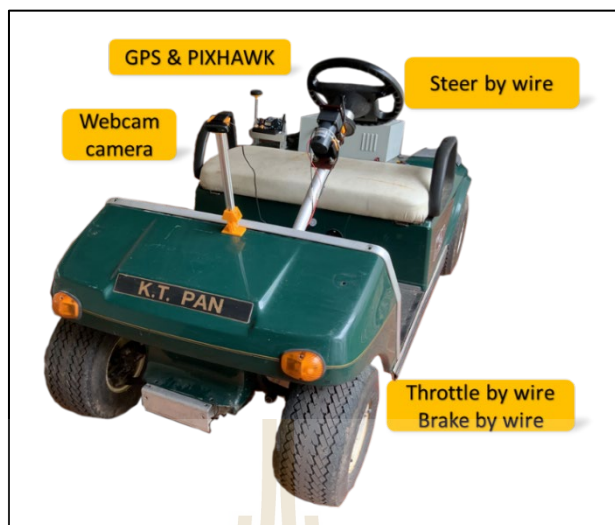
หลังจากได้สร้างระบบ Drive by wire ทั้งสามระบบได้สมบูรณ์แล้วจะต้องนำมาทำการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ออกแบบและวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ โดยระบบที่ใช้การทดสอบนี้คือระบบ Steer by wire ได้ทำการจำลอง Input แบบ Sweep และนำไปเข้าโปรแกรม CIFER ทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงความถี่ และให้ Transfer function ในการ ไปใช้ออกแบบ PID ด้วยวิธีการ Optimization เพื่อให้ได้การควบคุมระบบบังคับเลี้ยวที่มีประสิทธิภาพ และนำไปติดตั้งระบบควบคุมด้วย GPS เพื่อทำการทดสอบในการวิ่งโดยไม่มี การควบคุมโดยผู้ขับขี่ ในการเขียนใช้โปรแกรม Arduino IDE รวมทั้ง Library เพิ่มเติมดังนี้

- 1) Arduino PID Library by Brett Beauregard สำหรับการปรับปรุงผลการตอบสนอง
- 2) Smoothed by MattFryer สำหรับปรับปรุง Input ให้มีค่าราบเรียบขึ้น

โดยโค้ดทั้งหมดของระบบ Drive by wire ถูกจัดเก็บไว้ในลิงค์ Github โดยเปิดเป็นสาธารณะ ให้สามารถดาวน์โหลดได้จาก <https://github.com/p4nithi/Drive-by-wire.git>

#### 4.2 รถกอล์ฟและระบบ Drive by wire

หลังจากได้ออกแบบระบบและติดตั้งระบบก็ได้มีการปรับปรุงกลไกในส่วนของ Steer by wire เป็นต้นแบบที่ 2 โดยนำ Absolute encoder มาใช้ในการตรวจวัด ตำแหน่ง โดยมีข้อดีในการตรวจวัด คือ สามารถจดจำตำแหน่งของพวงมาลัยรถกอล์ฟได้แม้จะรีเซ็ตระบบ และในกลไกอื่นก็ได้มีการปรับปรุงชิ้นส่วนให้แข็งแรงขึ้นโดยการเปลี่ยนวัสดุในการขึ้นรูป โดยในการควบคุมรถกอล์ฟสามารถควบคุมได้สองแบบ จะใช้สัญญาณควบคุมจากรีโมทหรือควบคุมโดยผู้ขับขี่



รูปที่ 4.1 รถกอล์ฟที่ติดตั้งระบบ Drive by wire



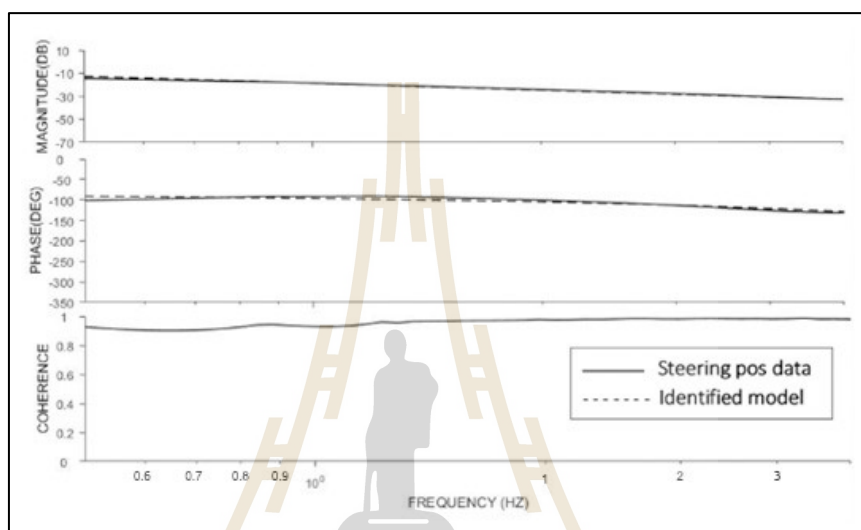
รูปที่ 4.2 ระบบควบคุม Steer by wire ต้นแบบที่ 2

#### 4.2.1 ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบ Steer by wire

จากการทดสอบการสร้างแบบจำลองด้วย CIFER ที่ใช้ Frequency response โดยให้ Input แบบ Sweep ที่ความถี่ 0.4-5 Hz ทำให้ได้ Transfer function ในสมการที่ 7 จากรูปที่ 4.3 ในการจำลองระบบค่าความเข้ากันได้ (Coherence) ของความถี่ที่จำลองกับความถี่จริง มากกว่า 90% ที่

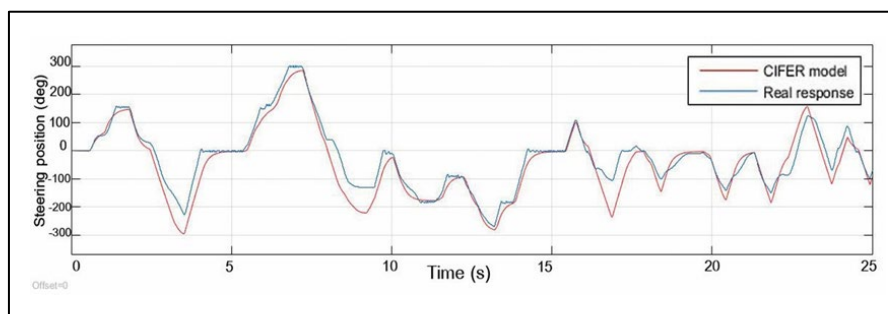
ความถี่ 0.4-3 Hz และค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนของสมการ (Cost function) อยู่ที่ 16.378 ซึ่งน้อยกว่า 100 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกับระบบจริง

$$G(s) = \frac{453.78e^{-0.0202s}}{s^2 + 620.76s + 104.79} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผล System identification ด้วย Frequency response

เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองจึงทำการนำผลการตอบสนองจริงมาเปรียบเทียบกับตามขั้นตอน ในหัวข้อที่ 3.3.2 จากผลการทดลองแนวโน้มน้ำและค่าของผลการตอบสนองมีทิศทางเดียวกัน



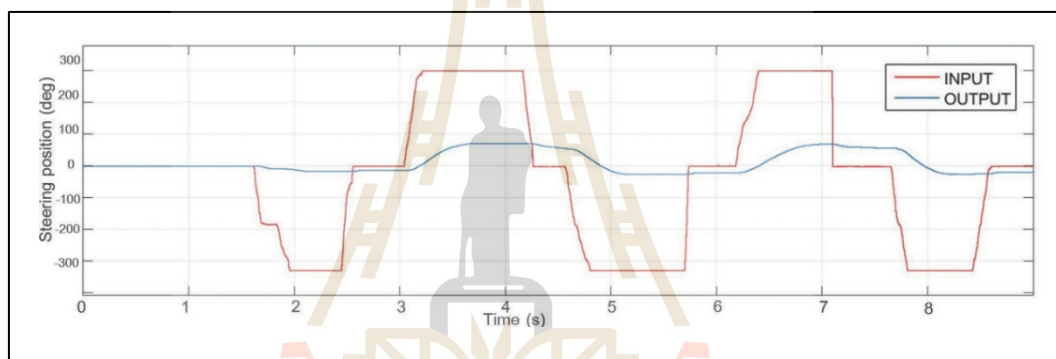
รูปที่ 4.4 ผลการตรวจสอบ Transfer function

#### 4.2.2 ผลการทดสอบการปรับปรุงผลการตอบสนองของ Steer by wire ด้วย PID

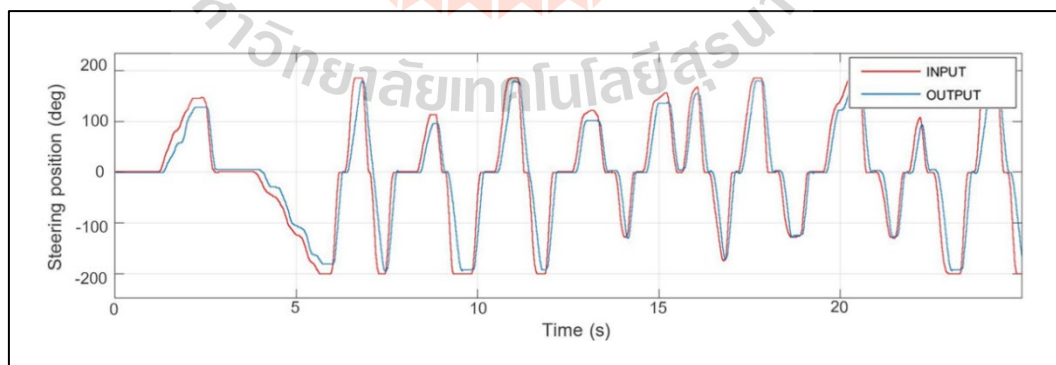
จากการหาค่าที่เหมาะสมของ PID ด้วย check step response optimization ใน MATLAB Simulink ที่ใช้ในการปรับปรุงผลการตอบสนองด้วยการจำลองระบบ ทำให้ได้ค่า PID ของ Steer by wire ดังนี้

$$K_p = 24.92 \quad K_i = 0.0098 \quad K_d = 0.2701$$

หลังจากได้ค่า PID ได้นำไปปรับแต่ง Code ใน Arduino และนำไปทดสอบและเก็บผลการตอบสนองของระบบและเปรียบเทียบ Close-loop control และ PID Close loop Control แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดของระบบใน Close-loop control ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงระบบด้วย PID มีค่า Error สูงสุดที่ 73.33% หลังจากปรับปรุงระบบด้วย PID มีค่า Error สูงสุดอยู่ที่ 10%



รูปที่ 4.5 Steer by wire close loop control โดยไม่มี PID control



รูปที่ 4.6 Steer by wire close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID

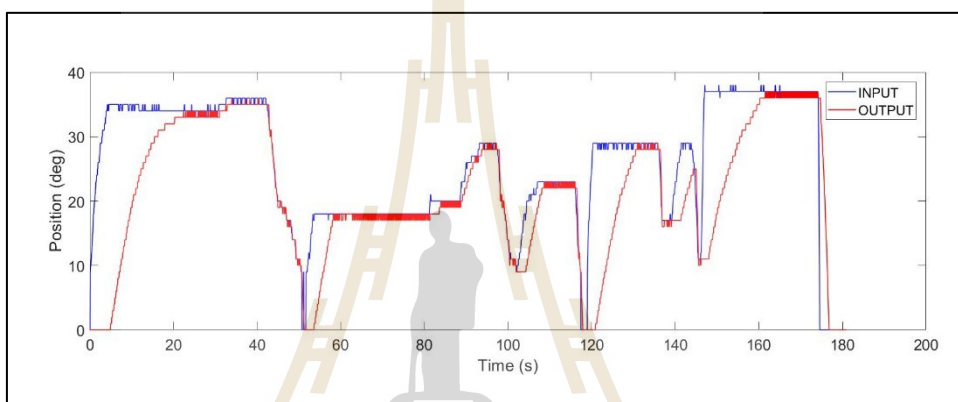


### 4.3 ผลการทดสอบการปรับปรุงผลการตอบสนองของ Throttle by wire ด้วย PID

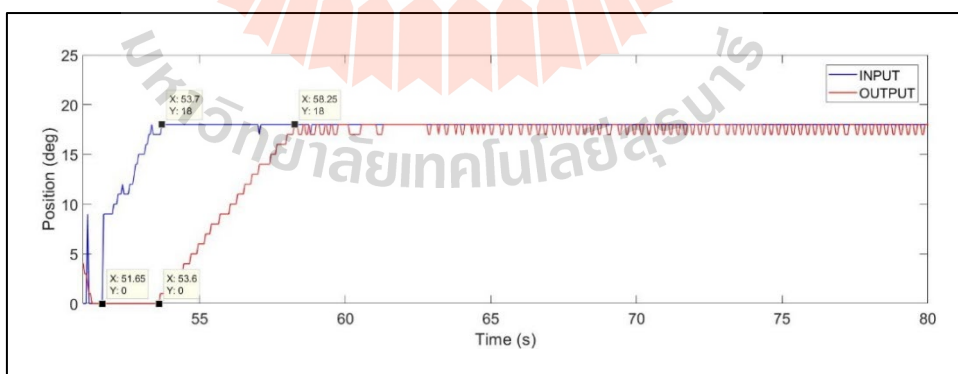
ในการออกแบบ PID ของระบบ Throttle by wire ใช้วิธีการ Trial and error ด้วยการเริ่มต้นค่า PID จากน้อยและค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยดูจากผลการตอบสนอง ไม่ได้ใช้การออกแบบจาก Transfer function เนื่องจาก การใช้ Sweep input นั้นส่งผลเสียต่อระบบกลไก และได้ค่า PID ดังนี้

$$K_p = 5 \qquad K_i = 2.5 \qquad K_d = 0.8$$

จากรูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองจะไม่มี Steady state error และ Overshoot แต่การตอบสนองของระบบในช่วงขาขึ้นนั้นมีการหน่วงที่ 2.5 วินาที เนื่องจากกลไกของข้อต่อกับแป้นเหยียบ



รูปที่ 4.7 Throttle by wire Close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID



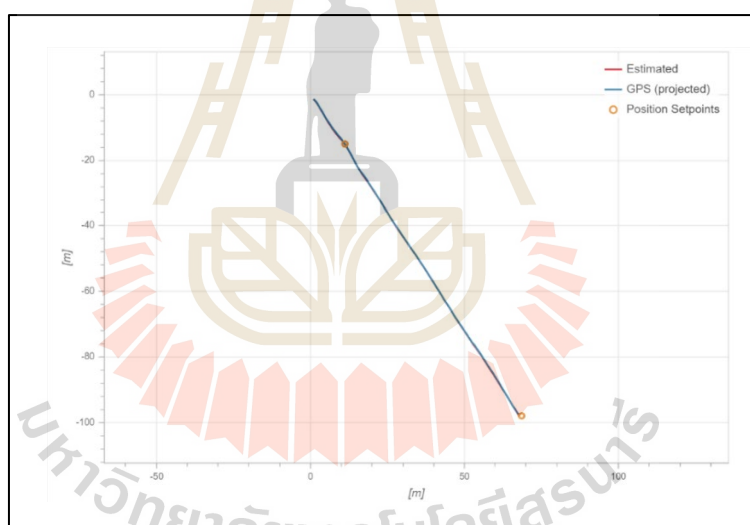
รูปที่ 4.8 Steer by wire Close loop control ที่ถูกปรับปรุงโดย PID ณ วินาทีที่ 51

#### 4.4 ผลการทดลองการวิ่งทดสอบด้วยระบบนำทาง GPS

สถานที่ทดสอบ ณ อาคารศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง เป็นพื้นที่เปิดโล่งเหมาะสำหรับการทดสอบ GPS เพราะไม่มีต้นไม้หรือตึกกีดขวางสัญญาณ การวิเคราะห์จากไฟล์ datalogger โดยการใช้ผ่านเว็บไซต์ <https://review.px4.io> ในการแสดงผลการทดสอบแต่ละรอบของการทดสอบ ซึ่งสามารถดูผลการตอบสนองของ Steering ในกราฟ Yaw angle ผลการตอบสนองของ Throttle ในกราฟ Velocity และสามารถดูการทำงานของ Controller ในกราฟ Actuator control

##### 4.4.1 การทดสอบการควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟ (Cruise speed control)

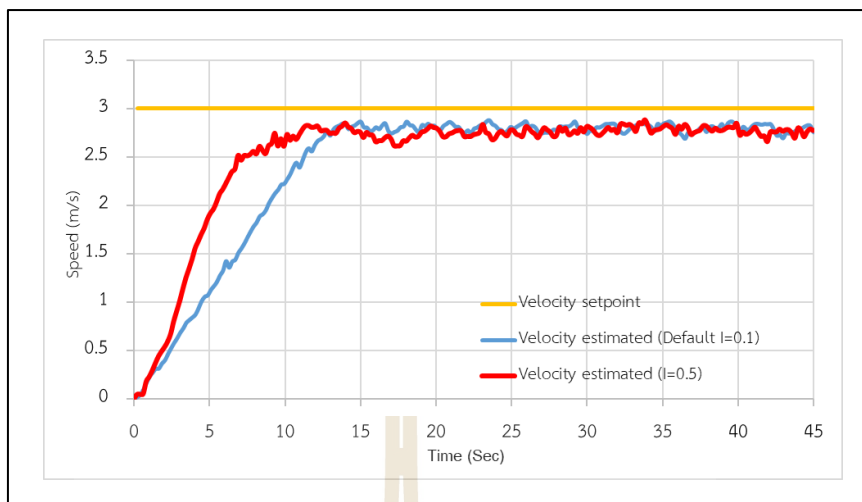
ในการควบคุมความเร็วของรถกอล์ฟนั้นจะต้องควบคุมระบบ Throttle by wire ในการปรับระดับแรงดันที่เข้าสู่มอเตอร์ขับเคลื่อนในการทดสอบโดยใช้ทางตรงระยะทาง 117 เมตร จิตความสามารถของรถกอล์ฟสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงสุด 6 เมตรต่อวินาที จึงได้ทดสอบที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที โดยคิดเป็น 50 % ของความเร็วสูงสุด



รูปที่ 4.9 เส้นทางรถเพื่อทดสอบ Cruise speed control

โดยได้ทำการปรับปรุงผลการตอบสนองด้วย PI control โดยในการทดสอบได้ทำการใช้ P เท่ากันที่ 1.5 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของระบบ และปรับปรุงค่า I จาก GND\_SPEED\_I

ผลการตอบสนองที่ได้ตามรูปที่ 4.10 เส้นสีน้ำเงินเป็นค่าเริ่มต้นของ I ที่ 0.1 ไม่มี overshoot เกิดขึ้น และ Rise time อยู่ที่ 12.5 วินาที เมื่อทำการปรับ I เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 จากเส้นสีแดงทำให้ผลการตอบสนองเร็วขึ้น Rise time ลดลง 5 วินาที แต่ steady state error ไม่เปลี่ยนแปลง โดยอยู่ที่ 0.25 เมตรต่อวินาที คิดเป็น 8.33 % ผลการทดสอบ สามารถคงความเร็วได้ที่ 2.75 เมตรต่อวินาที



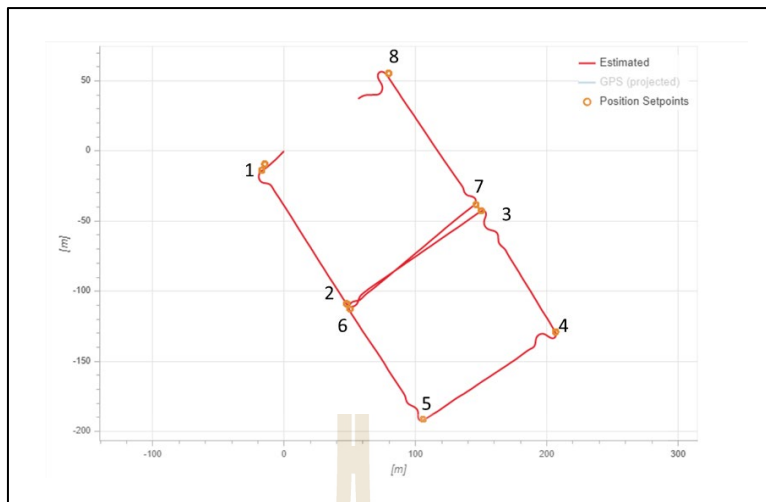
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ Cruise speed control ที่ Setpoint 3 m/s

#### 4.4.2 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็วสูงสุด 3 เมตรต่อวินาที

ได้ทำการทดสอบบนพื้นที่โล่งและกำหนดจุดสำหรับให้รถเคลื่อนที่ไปตามลำดับ 1 ถึง 8 ดังรูปที่ 4.12 เป็นระยะทาง 883 เมตร ด้วยการปรับตัวแปร GND\_SPEED\_I เท่ากับ 0.5 และกำหนดความเร็วสูงสุดที่ 3 เมตรต่อวินาที ในการควบคุมทิศทางได้ปรับปรุงผลการตอบสนองด้วยอัตราขยาย  $P = 2$  และ  $I = 0.06$  จากผลการทดสอบ เกิดการล่าช้าของรถกอล์ฟที่ 3, 4, 5, 7 และ 8 โดยโค้งที่ 3 ล่าช้าเป็นระยะทางมากที่สุด



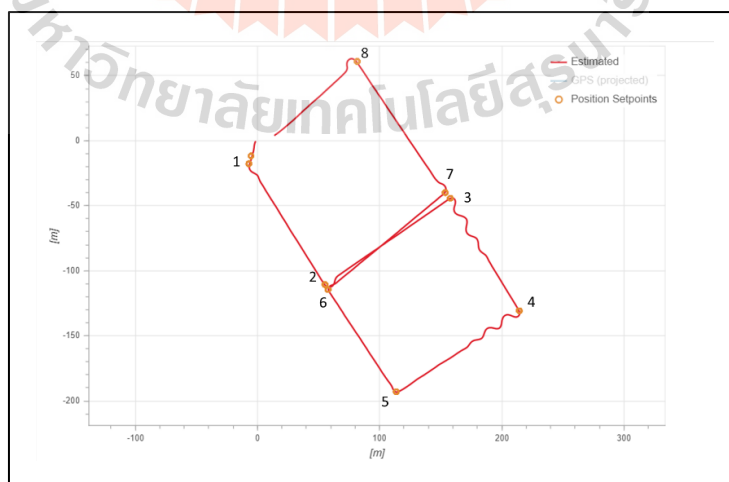
รูปที่ 4.11 แผนที่เส้นการวิ่งตาม Setpoint ที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบและลำดับการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที

#### 4.4.3 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็วสูงสุด 4 เมตรต่อวินาที

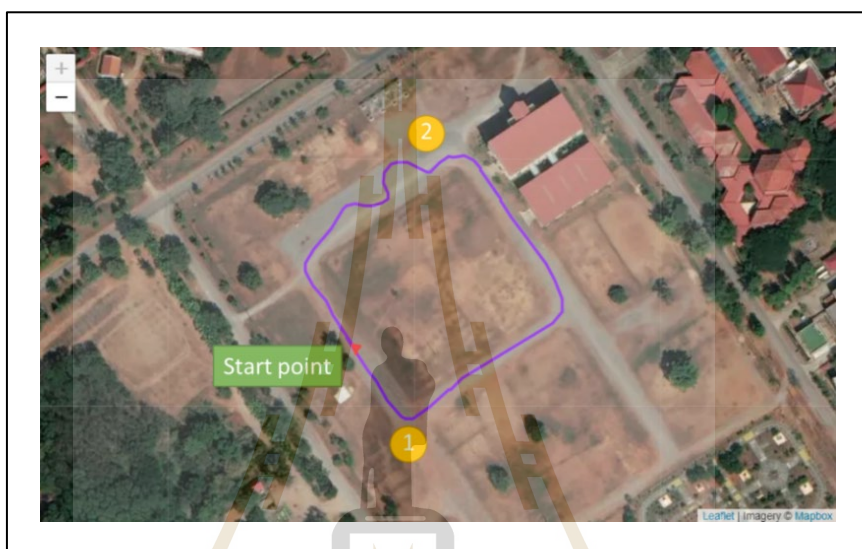
ในการทดสอบนี้จะเพิ่มความเร็วสูงสุดในการวิ่งตาม Setpoint และกำหนดตัวแปรอัตราขยาย PI เหมือนการทดสอบที่ 4.4.2 แต่จะปรับความเร็วสูงสุดที่ 4 เมตรต่อวินาทีเพื่อดูผลการตอบสนองต่อทางโค้ง จากรูปที่ 4.13 พบว่าโค้งที่ 3 และ 4 เกิดการส่ายของรถกอล์ฟ มากกว่าการทดสอบที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที ก่อนจะกลับเข้าสู่เส้นทางตรง ไม่เป็นผลดีในการวิ่งจริงจึงได้ทำการปรับปรุงการกำหนดจุดและอัตราขยายใหม่ในการทดสอบที่ 4.4.4



รูปที่ 4.13 ลำดับการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ความเร็ว 4 เมตรต่อวินาที

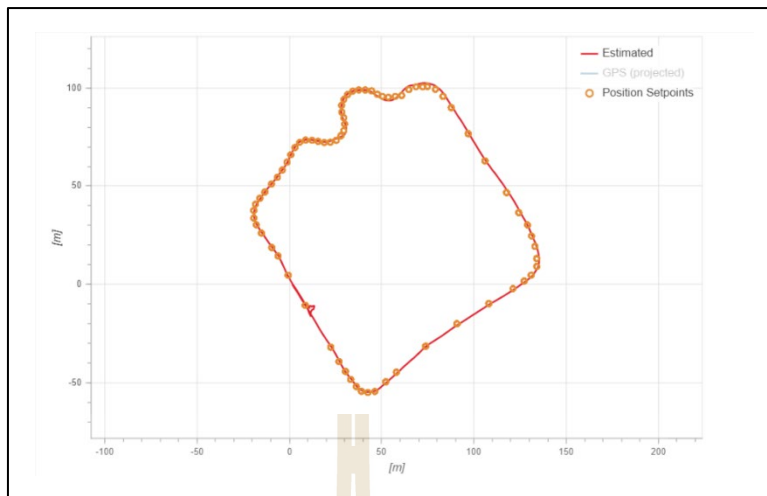
#### 4.4.4 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ $P = 1.6, I = 0.01$

ในการทดสอบนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางการวิ่งให้เหลือ 400 เมตร เริ่มวิ่งจากจุด Start point และวนในทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยมีการทดสอบและดูผลการตอบสนองโค้งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.14 โดยใช้ความเร็วสูงสุดที่ 3 เมตรต่อวินาที และใช้การปรับอัตราขยายของ Wheel rate (GND\_WR\_PI) หรือ อัตราการหมุนพวงมาลัย ที่  $P = 1.6, I = 0.01$



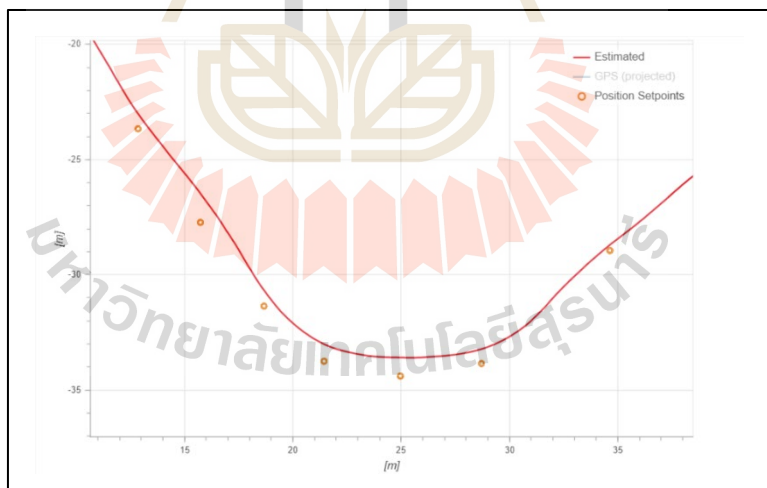
รูปที่ 4.14 แผนที่เส้นการวิ่งตาม Setpoint ที่  $P = 1.6, I = 0.01$

จากผลการทดสอบที่ 4.4.2 และ 4.4.3 ในการเลี้ยวโค้งนั้นเกิดการส่ายเนื่องจากเป็นโค้งที่เป็นมุมหักศอก จึงได้ทำการเพิ่มจุด setpoint เพื่อสามารถเลี้ยวโค้งได้ง่ายขึ้น และได้ทำการเพิ่มการเลี้ยวแบบซิกแซกที่โค้งที่ 2 เพื่อดูผลการตอบสนอง จากผลการทดสอบรูปที่ 4.15 รถกอล์ฟสามารถวิ่งตามจุด Setpoint โดยไม่มีการส่ายเกิดขึ้นแต่ในการตอบสนองในการเลี้ยวโค้งยังมีค่าผิดพลาด



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบเส้นทางกรวิ้งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่  $P = 1.6$ ,  $I = 0.01$

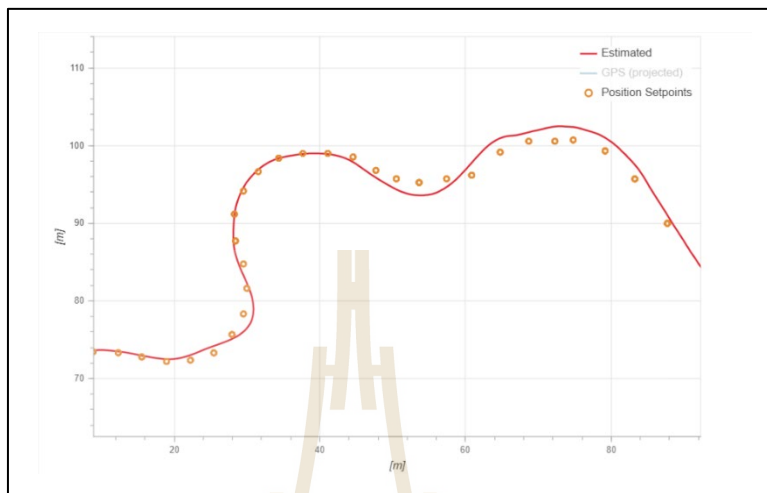
จากรูปที่ 4.16 ในโค้งที่ 1 รถกอล์ฟ สามารถวิ้งไปตามโค้งที่กำหนดได้แต่ยังไม่เข้าสู่ Setpoint เกิดความผิดพลาดในการวิ้งโดยคิดเป็นระยะทางห่างจาก Setpoint 1 ถึง 2 เมตร



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบวิ้งที่โค้งที่ 1 ด้วย  $P = 1.6$ ,  $I = 0.01$

จากรูปที่ 4.17 ที่โค้งที่ 2 รถกอล์ฟยังสามารถวิ้งไปตาม Setpoint ได้โดยไม่มี การส่ายเกิดขึ้นแต่ในบางส่วนของโค้งรถกอล์ฟวิ้งออกจาก Setpoint โดยมีระยะห่าง 1 ถึง 1.8 เมตร

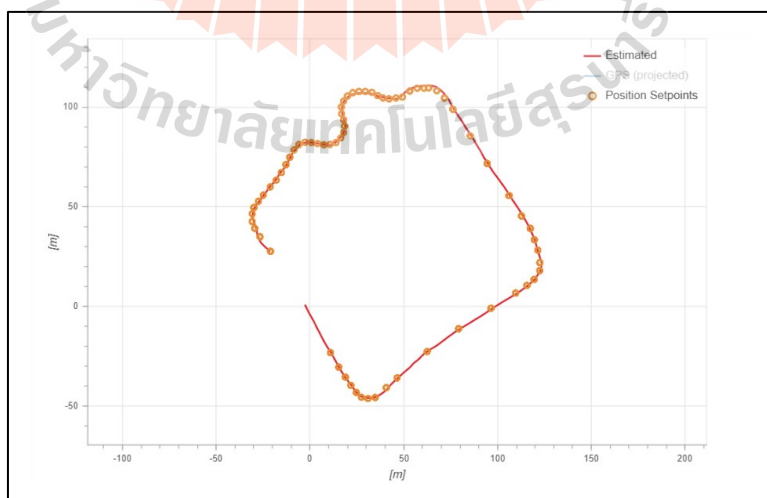
และวงกลับเข้า Setpoint แสดงให้เห็นว่าจะต้องปรับอัตราขยายให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้รถวิ่งเข้าสู่ Setpoint ที่ตั้งไว้ในทางโค้งชันแกก



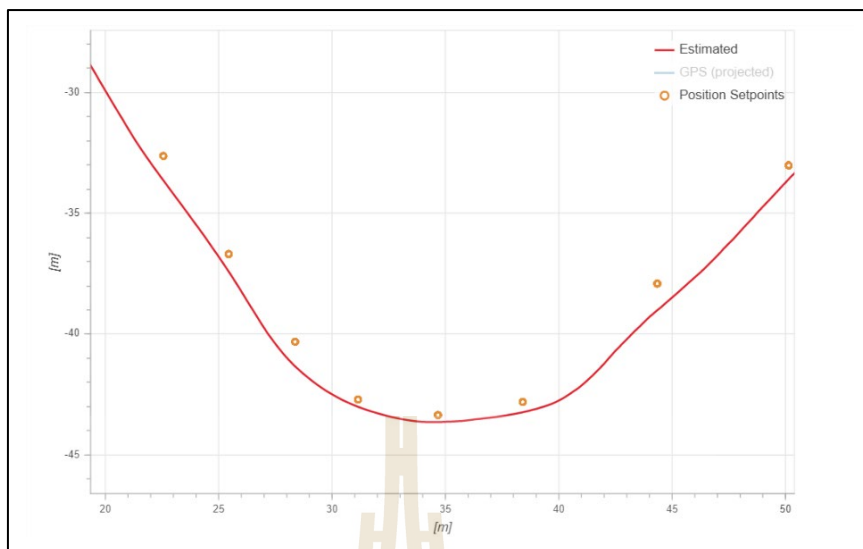
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบวงที่โค้งที่ 2 ด้วย  $P = 1.6, I = 0.01$

#### 4.4.5 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ $P = 2, I = 0.01$

จากการปรับอัตราขยาย  $P$  เพิ่มขึ้น รถกอล์ฟยังสามารถวิ่งตามจุด Setpoint ได้ทุกจุด โดยที่ความผิดพลาดจากโค้งที่ 1 ดังรูปที่ 4.19 ลดลงเหลือ 0.3 ถึง 0.5 เมตร

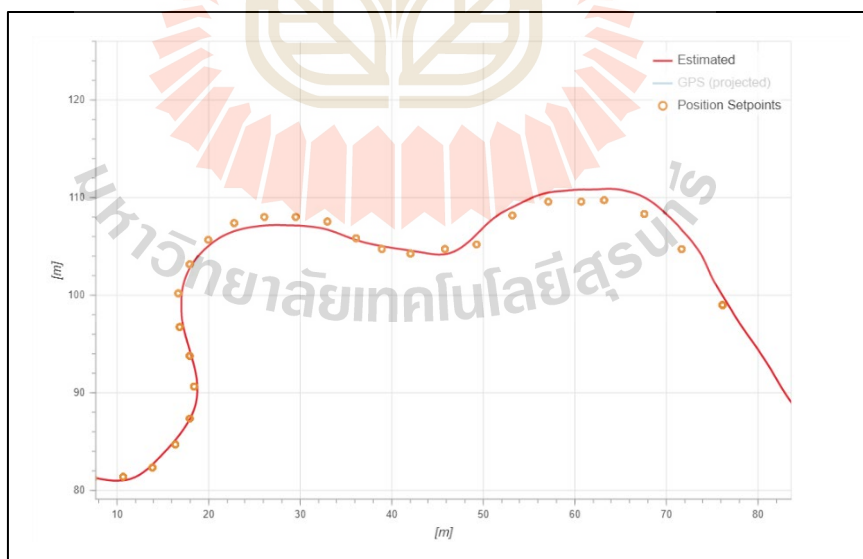


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบเส้นทางการวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่  $P = 2.0, I = 0.01$



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบวงที่โค้งที่ 1 ด้วย  $P = 2.0$ ,  $I = 0.01$

ในโค้งซิกแซกที่ 2 มีการเข้าจุด setpoint ที่มากกว่า และหลุดออกจากโค้งน้อยลง คิดเป็นระยะ 0.5 ถึง 1.5 เมตร ดังรูปที่ 4.20

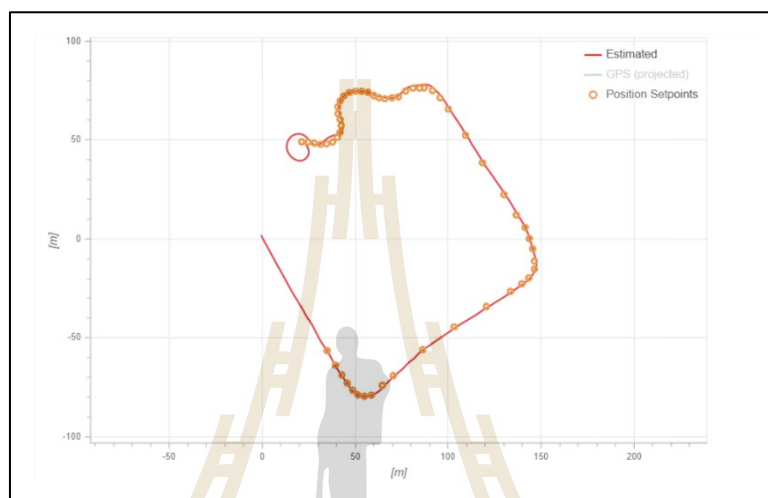


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบวงที่โค้งที่ 2 ด้วย  $P = 2.0$ ,  $I = 0.01$



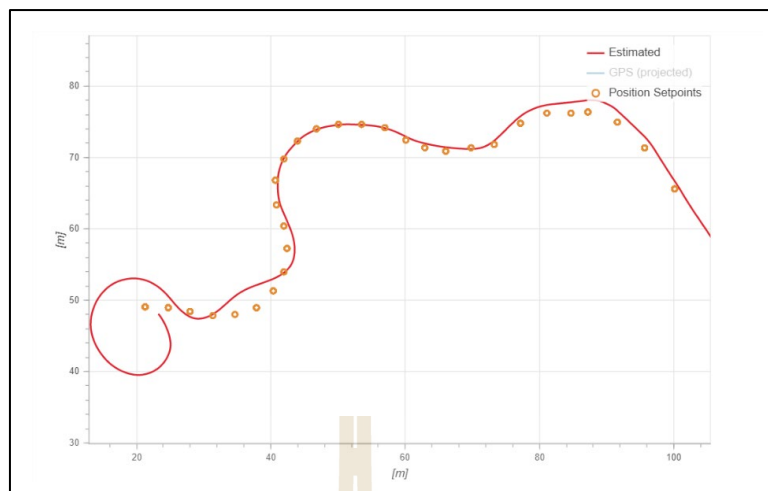
#### 4.4.6 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ $P = 2.2, I = 0.01$

เมื่อทำการปรับอัตราขยาย  $P$  เพิ่มขึ้นเป็น 2.2 คาดว่าความผิดพลาดระหว่าง โคนิ่งนั้น จะลดลงและรถสามารถวิ่งเข้าจุด Setpoint ได้ดีกว่าเดิม ผลการทดสอบจากรูปที่ 4.21 รถกอล์ฟสามารถวิ่งไปยัง โคนิ่งที่ 1 ได้ แต่เมื่อผ่าน โคนิ่งซิกแซกที่ 2 รถกอล์ฟไม่สามารถวิ่งเข้าสู่ Setpoint ได้ และได้หลุดออกจากเส้นทาง เกิดการวิ่งวนเพื่อให้เข้าสู่ Setpoint



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบเส้นทางวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่  $P = 2.2, I = 0.01$

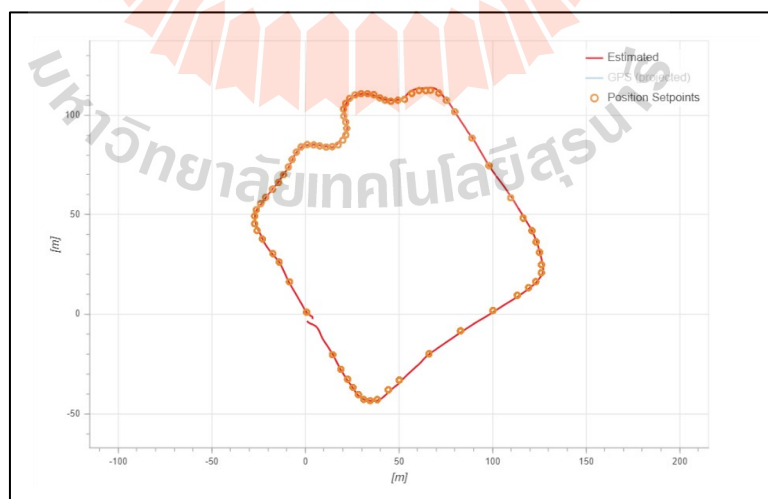
ด้วยอัตราขยาย  $P$  ที่มากเกินไปทำให้เกิดความผิดพลาด ใน โคนิ่งซิกแซกที่ 2 รถกอล์ฟวิ่งออกจากจุด Setpoint จึงต้องทำการปรับอัตราขยาย  $P$  ใหม่และเพิ่มอัตราขยาย  $I$  เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



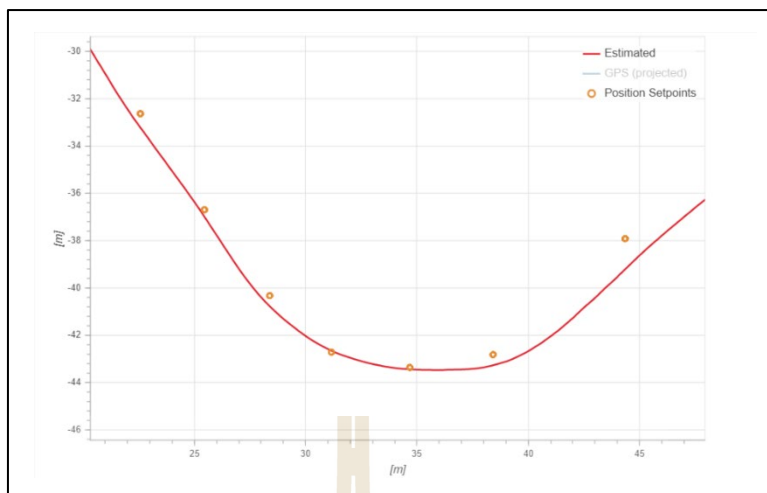
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบวงที่โค้งที่ 2 ด้วย  $P = 2.2$ ,  $I = 0.01$

#### 4.4.7 ผลทดสอบการวิ่งตามจุด Setpoint ที่ $P = 2$ , $I = 0.05$

ในการทดสอบนี้ได้ทำการปรับอัตราขยายของอัตราการเลี้ยวเป็น  $P = 2$ ,  $I = 0.05$  จากรูปที่ 4.23 รถกอล์ฟสามารถวิ่งเข้าสู่ Setpoint ได้จนครบรอบ ในการเลี้ยวของโค้งที่ 1 จากรูปที่ 4.24 รถกอล์ฟสามารถวิ่งเข้าโค้งได้อย่างดีและความผิดพลาดระยะห่างของ Setpoint ลดลงคิดเป็นระยะ 0.2 ถึง 0.5 เมตร

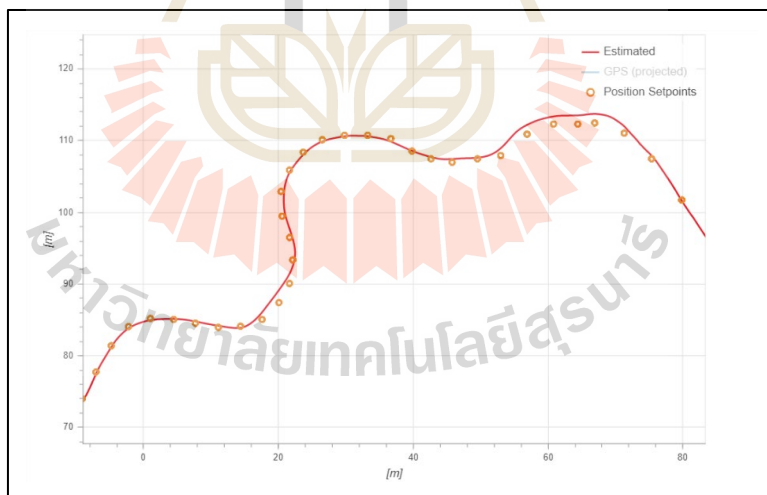


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบเส้นทางกรวิ่งของรถกอล์ฟ และจุด Setpoint ที่  $P = 2.0$ ,  $I = 0.05$



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 1 ด้วย  $P = 2.0$ ,  $I = 0.05$

ในการทดสอบการเลี้ยวซิกแซกที่โค้งที่สอง รถกอล์ฟมีการเลี้ยวตามจุด Setpoint โดยมีความผิดพลาดคิดเป็นระยะ 0.5 ถึง 1.25 เมตร



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบวิ่งที่โค้งที่ 2 ด้วย  $P = 2.0$ ,  $I = 0.05$

#### 4.5 การทดสอบระบบเบรก (Brake by wire)

การควบคุมระบบไฟฟ้าของเบรคนั้น จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่ควบคุมโดย Arduino เป็นตัวส่งกำลังเพื่อไปขับเคลื่อนกลไกให้ระบบเบรกที่เป็นทางกลนั้นทำงาน ซึ่งต่างจากปกติที่เราจะถ่ายทอดแรงเหยียบไปที่แป้นเบรกเพื่อทำให้รถหยุด ซึ่งก็คือสามารถทำงานได้ทั้งระบบทางกลที่มีอยู่เดิม และระบบทางไฟฟ้าที่ต่อเติมเพิ่มเข้าไป หรือเป็นการเปลี่ยน Input จากการเหยียบเบรกด้วยเท้า เพื่อให้รถหยุดมาเป็นการที่มอเตอร์ไฟฟ้ามาทำให้แป้นเบรกดกลงเพื่อทำให้รถหยุดหรือเบรกแทน โดยได้ทำการทดสอบระยะเบรกเทียบกับสัญญาณ PWM ที่ทำการจ่ายเข้าไปเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ DC

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเบรกที่สัญญาณ PWM = 180

ความเร็ว (m/s)	ระยะเบรก (m)		ระยะเบรกเฉลี่ย (m)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
1	0.60	0.70	0.65
2	2.40	2.30	2.35
3	5.50	5.70	5.60
4	8.90	8.50	8.70
5	11.70	11.35	11.53

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบระยะเบรกที่สัญญาณ PWM = 255

ความเร็ว (m/s)	ระยะเบรก (m)		ระยะเบรกเฉลี่ย (m)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
1	0.37	0.39	0.38
2	2.10	1.95	2.03
3	4.70	4.25	4.48
4	6.80	7.70	7.25
5	10.30	10.10	10.20

#### 4.5.1 การทดสอบระบบเบรกฉุกเฉิน (Emergency brake)

เมื่อมีสิ่งกีดขวางหรือมีวัตถุเคลื่อนตัดหน้ารถในระยะ 1 เมตรนั้น เซ็นเซอร์แสงจะสามารถตรวจจับวัตถุและระบบจะตัดการทำงานของระบบคันเร่งพร้อมกับสั่งให้ระบบเบรก (Brake by wire) ทำงานในทันทีเพื่อป้องกันการชน โดยระบบเบรกจะสามารถหยุดรถได้และไม่เกิดการชนในการทดสอบใช้ความเร็วของรถกอล์ฟที่ 1.8 เมตรต่อวินาที เมื่อมีความเร็วสูงกว่า 1.8-2 เมตรต่อวินาที จำเป็นต้องใช้ระยะเบรกที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องด้วยระบบเบรกเดิมของรถเป็นแบบดรัมเบรกที่ 2 ล้อหลังเพียงเท่านั้น ไม่มีระบบเบรกที่ล้อหน้าจึงทำให้แรงเบรคน้อย



รูปที่ 4.26 การทดสอบระบบเบรกฉุกเฉิน

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการสร้างระบบควบคุมกลไกของรถกอล์ฟด้วยมอเตอร์สามารถควบคุมกลไกของพวงมาลัย คันเร่ง และเบรก (Drive by wire) ด้วยสัญญาณ PWM และสามารถลดความผิดพลาดในการตอบสนองด้วย Close loop feed back ด้วยการปรับตรงขยาย PID control โดยใช้ Rotary Encoder ในการตรวจสอบมุมและป้อนกลับไปคำนวณ PID ด้วย Arduino Uno R3

PID ของระบบ Steer by wire ซึ่งได้ออกแบบด้วยวิธีการ System identification ด้วยโปรแกรม CIFER โดยใช้ Frequency response และ Sweep input ที่ 0.4-5 Hz ในการหา Transfer function จากสมการที่ 4.7 และนำไปเข้ากระบวนการ Optimization ด้วย MATLAB Simulink ทำให้ได้ค่า PID ของเท่ากับ  $K_p = 24.92$ ,  $K_i = 0.0098$  และ  $K_d = 0.2701$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

PID ของระบบ Throttle by wire ได้ออกแบบด้วยวิธีการ Trial and Error ทำให้ได้ค่า PID เท่ากับ  $K_p = 5$ ,  $K_i = 2.5$  และ  $K_d = 0.8$  ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

เมื่อทำการปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบคันเร่งและพวงมาลัยแล้วจึงได้นำบอร์ด Pixhawk เข้ามาควบคุมการเคลื่อนที่อัตโนมัติตามจุด Setpoint ด้วยโปรแกรม QGround control โดยกำหนดบนแผนและใช้สัญญาณ GPS เป็นตัวเทียบวัด ในการทดสอบการวิ่งด้วยความเร็วคงที่ (Cruise control) 3 เมตรต่อวินาที สามารถทำความเร็วได้ 2.75 เมตรต่อวินาที Error = 8.33 % จากการปรับผลการตอบสนองอัตราการเหยียบคันเร่ง GND\_Throttle\_PI ซึ่งได้ค่า  $K_p = 1.5$  และ  $K_i = 0.5$

หลังจากทำการควบคุมการรักษาความเร็วให้คงที่จึงได้ทำการทดสอบการบังคับเลี้ยวในเส้นทางที่กำหนดและปรับผลการตอบสนองของอัตราการเลี้ยวด้วย GND\_WR\_PI สามารถให้ผลการตอบสนองมีความผิดพลาดคิดเป็นระยะทางที่ห่างจาก Setpoint อยู่ที่ 0 ถึง 1.25 เมตร และมีเสถียรภาพ โดยได้อัตราขยาย  $K_p = 2$  และ  $K_i = 0.5$

การเบรกฉุกเฉินในกรณีที่มีวัตถุเข้ามาตัดหน้ารถหรือจะขับเข้าชน โดยเซ็นเซอร์แสงชนิด Diffuse สามารถตรวจจับได้ในระยะที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เมตร และความเร็วที่ต่ำกว่า 1.8 เมตรต่อวินาที ด้วยพื้นถนนคอนกรีตและไม่มีน้ำขังจึงจะสามารถเบรกได้และไม่เกิดการชน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบเบรกและคันเร่งสามารถปรับปรุงให้มีผลการตอบสนองที่ดีขึ้นได้ โดยการนำกลไกทดกำลังด้วยน้ำมัน Hydraulic มาแทนที่กลไกข้อต่อและสลิงแบบเดิม
2. การปรับปรุงผลการตอบสนองด้วย PID controller การเขียนโปรแกรมด้วย Arduino จะต้องใช้ในการอ่านค่าการตอบสนองของ Sensor ป้อนกลับด้วยเวลาที่แม่นยำ เพราะมีผลต่อการคำนวณอัตราขยาย I และ D ถ้าไม่สามารถอ่านค่าเวลาที่แม่นยำได้จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ควรใช้การ Interrupt ในการวัดค่าจาก Sensor
3. การใช้ระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติด้วย Pixhawk สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของตำแหน่งที่รถกอล์ฟวิ่งได้ด้วยการใช้ฐานตรวจจับการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (SIRIUS RTK GNSS Base, M8P) ร่วมกับ GPS โมดูล (Sirius GNSS, M8N)

## รายการอ้างอิง

- วิภาพ ใจแข็ง. (2016). ระบบควบคุม Control system. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. 194 น.
- Park, T.-J., Han, C-S. and Lee, S.-H. (2005). Development of the electronic control unit for the rack-actuating steer-by-wire using the hardware-in-the-loop simulation system. *Mechatronics*, 15(8), 899–918.
- Mark, B-T. and Robert, K-R. (2006). *Aircraft and Rotorcraft System Identification Engineering Methods with Flight Test Examples*. AIAA education series, 2006.
- Vicente, M. Joshue, P-R. Enrique, O. Carlos, G. and Teresa, D-P. (2009). *Electric Power Controller for Steering Wheel Management in Electric Cars, Compatibility and Power Electronics 2009.*, May 2009, Badajoz, Spain.
- Chong, Z. et al. (2011). Autonomous personal vehicle for the first-and last-mile transportation services. 2011 IEEE 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS).
- Pratik, P. and Ketan, S. (2012). Drive-By-Wire Systems in Automobiles. *Journal of systematic computing*, VVP Engineering, India, Vol.6.
- Katsuhiko, O. (2012). *Modern Control Engineering*. 5th ed. Prentice Hall Inc., New York.
- Chandra, S-G. et al. (2013) Design and Development of Digital PID Controller for DC Motor Drive System Using Embedded Platform for Mobile Robot. 2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC), pp. 52-55.
- Pendleton, Scott, et al. (2015). Autonomous Golf Cars for Public Trial of Mobility-on-Demand Service. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (September 2015).
- Watcharapol, S. Suradet, T. Chalothorn, T and Jiraphon, S. (2017). Implementation of system identification and flight control system for UAV. *Control Automation and Robotics (ICCAR)*, 2017, pp. 678-683.

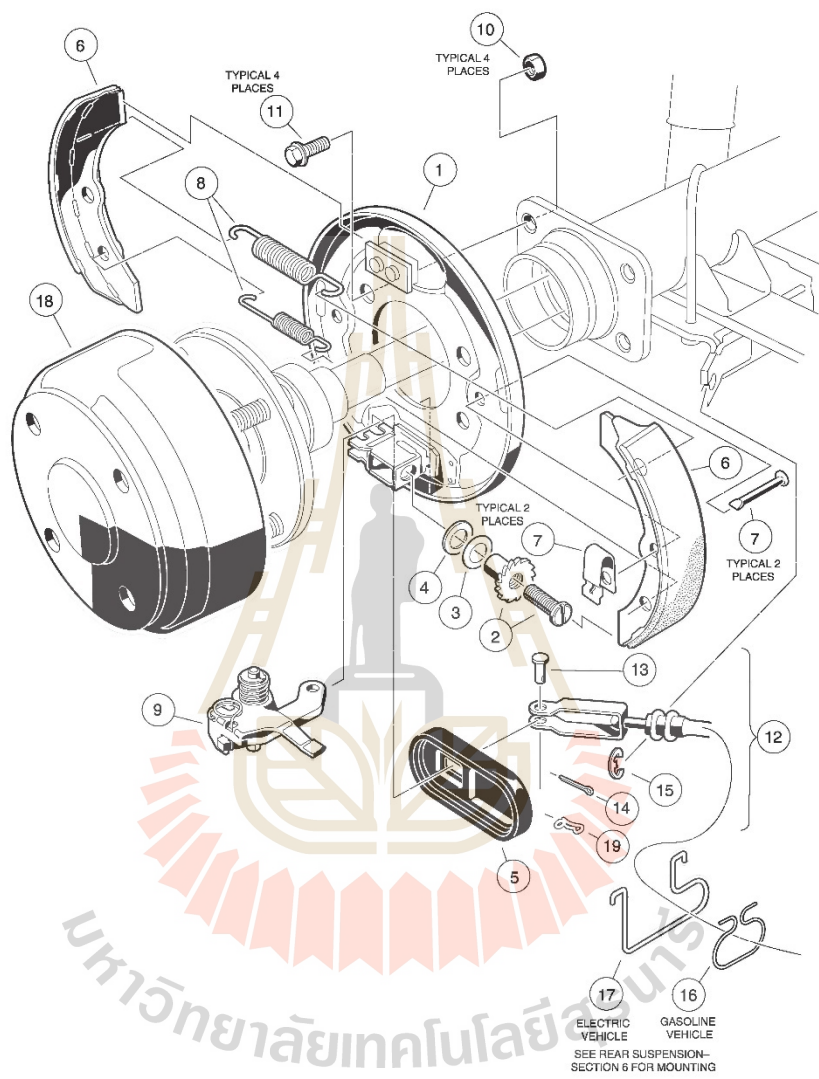


ภาคผนวก ก

กติกาเบรกและคันเร่งของรถกอล์ฟ Club car DS 2005

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

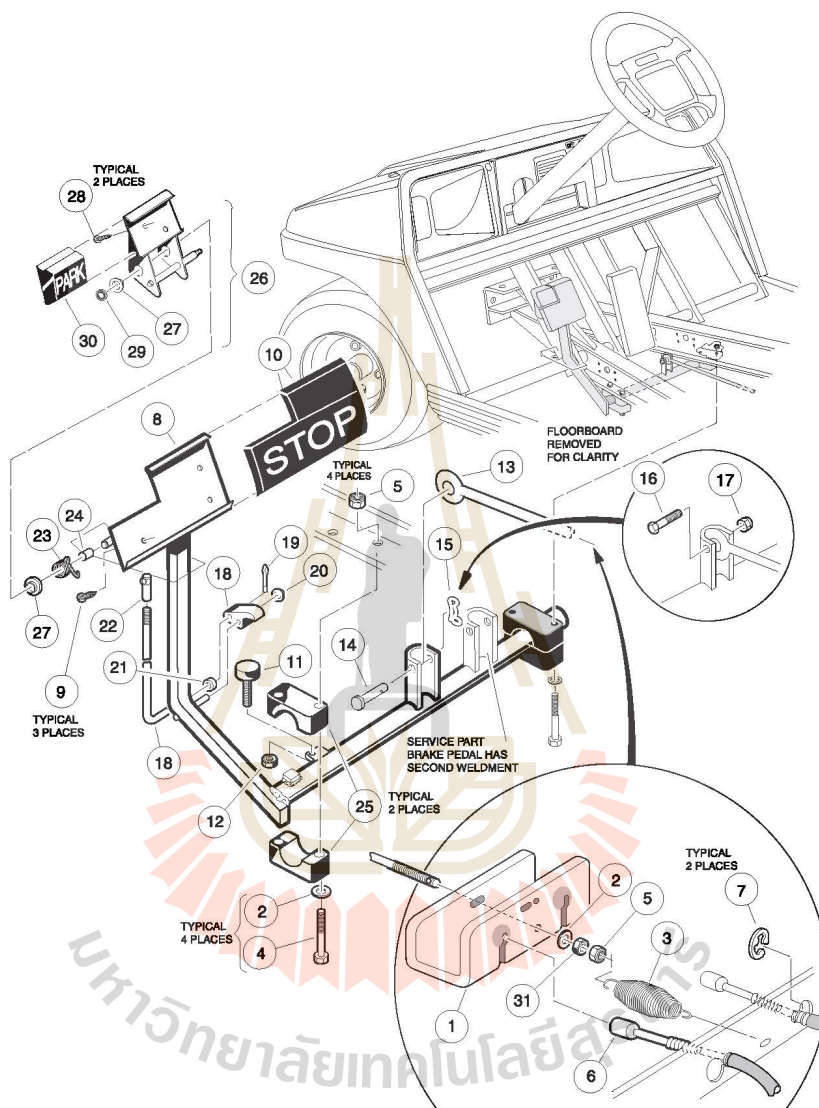
**4**  
**G**  
**E**



## BRAKE ASSEMBLY

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY	QTY	4 G E
			GAS	ELEC	
		1 2 3 4			
	101823301	Cluster, Brake, Passenger-Side (includes items 1 - 9) .....	1	1	
	101823302	Cluster, Brake, Driver-Side (includes items 1 - 9) .....	1	1	
1	101824001	Assembly, Backing Plate, Passenger-Side (includes items 2 - 4) .....	1	1	
1	101824002	Assembly, Backing Plate, Driver-Side (includes items 2 - 4) .....	1	1	
2	101816501	Mechanism, Adjusting, Passenger-Side .....	1	1	
2	101816502	Mechanism, Adjusting, Driver-Side .....	1	1	
3	101823901	Washer .....	1	1	
4	101823801	Washer, Plate .....	1	1	
5	1010850	Cover, Dust .....	1	1	
6	101823201	Package, Brake Shoe (four pieces) .....	1	1	
7	1011466	Kit, Shoe Retainer (four pieces) .....	1	1	
8	101816301	Package, Brake Spring (four pieces) .....	1	1	
9	101815501	Assembly, Lever, Passenger-Side .....	1	1	
9	101815502	Assembly, Lever, Driver-Side .....	1	1	
10	1013924	Nut, Hex Lock, Grade 8, 5/16-24 .....	8	8	
11	1014153	Bolt, Brake Cluster Mounting, Grade 8, 5/16-24 x 7/8 .....	8	8	
12	102022101	Kit, Brake Cable (includes items 13 -15) .....	2	2	
13	1010829	Pin, Clevis, 5/16 .....	2	2	
14	1035	Pin, Cotter .....	2	2	
15	1011779	E-Clip, 1/2 .....	2	2	
16	101900801	Hanger, Brake Cable (gasoline vehicle only) .....	2		
17	1013207	Hanger, Brake Cable (electric vehicle only) .....		2	
18	101791101	Drum, Brake .....	2	2	
19	102292801	Pin, Bow Tie Locking .....		22	

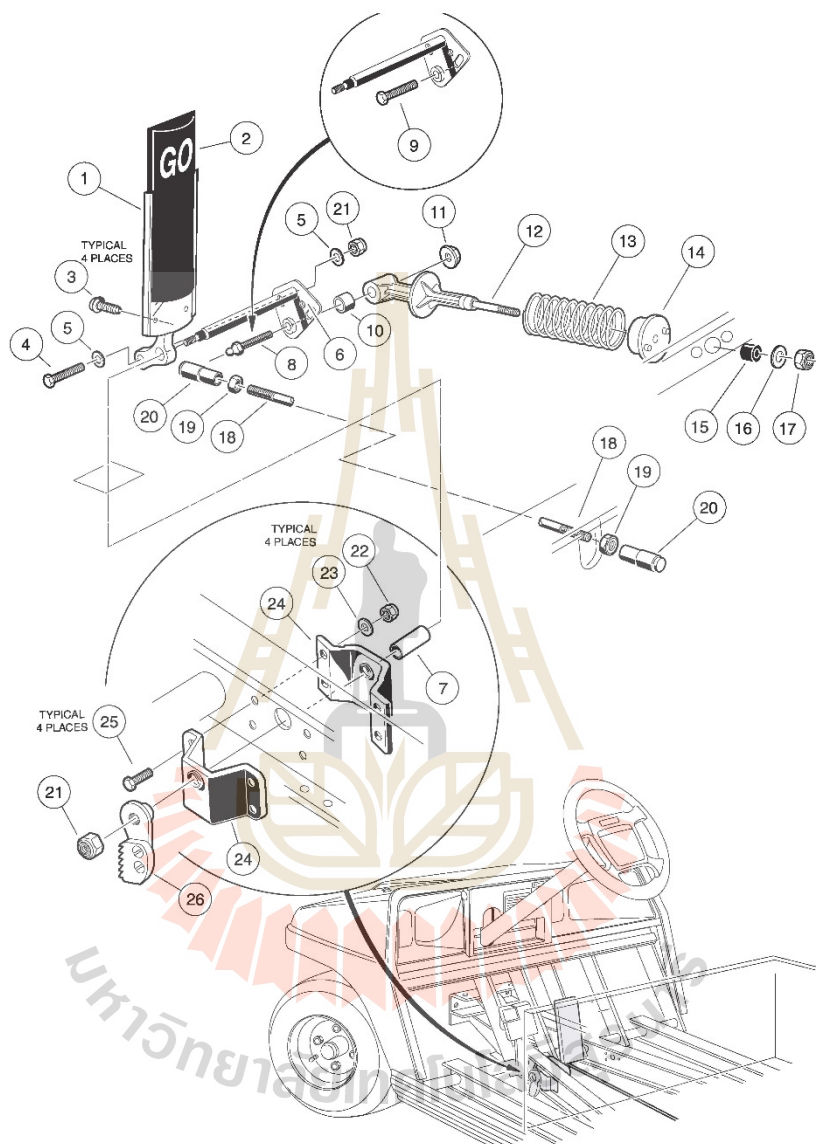
**4**  
**G**  
**E**



## BRAKE PEDAL AND CABLE ASSEMBLY

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY	QTY	4
			GAS	ELEC	
		<b>1 2 3 4</b>			G
1	101990801	Equalizer .....	1	1	E
2	1241	Washer, Flat, 5/16 .....	5	5	
3	1013531	Spring, Brake Return .....	1	1	
4	1010921	Screw, Hex-Head Cap, 5/16-18 x 2-1/2 .....	4	4	
5	7473	Nut, Nylon Lock, 5/16-18 .....	5	5	
6	102022101	Kit, Brake Cable (includes item 7, and items 13 and 14 on page 4-3) .....	2	2	
7	1011779	E-Clip, 1/2 .....	2	2	
8	101878201	Kit, Brake Pedal (includes items 9 and 10) .....	1	1	
9	7716	Screw, Slotted Hex Washer-Head, #10-16 x 1/2 .....	3	3	
10	1013869	Pad, Brake Pedal .....	1	1	
11	1010878	Bumper, Rubber .....	1	1	
12	1028	Nut, Hex, 1/4-20 .....	1	1	
13	101953101	Rod, Equalizer .....	1	1	
14	102323201	Pin, Clevis, 5/16 (later style hardware) .....	1	1	
15	102323101	Pin, Bow Tie Locking (later style hardware) .....	1	1	
16	101953001	Bolt, Hex-Head Shoulder, 3/8 x 1 (earlier style hardware) .....	1	1	
17	7473	Nut, Nylon Lock, 5/16-18 (earlier style hardware) .....	1	1	
	101187702	Kit, Park Brake Latch (includes items 18 - 22 and item 26 on page 4-7) .....	1	1	
18	N/A	Rod and Pawl .....	1	1	
19	1017029	Pin, Cotter, 7/64 x 1/2 .....	1	1	
20	1010877	Nut, Push, 5/16 .....	1	1	
21	1010805	Sleeve, Park Brake Rod .....	1	1	
22	1010932	Joint, Ball, 1/4-28 .....	1	1	
23	1010933	Spring, Park Brake Torsion .....	1	1	
24	1010927	Spacer, Park Brake .....	1	1	
25	1011402	Package, Brake Mounting Block (contains upper and lower for driver and passenger sides) .....	1	1	
26	1011418	Kit, Park Brake Pedal (includes items 27 - 30) .....	1	1	
27	1032	Bushing, Nylon .....	2	2	
28	8626	Screw, Slotted Hex Washer-Head, #10-16 x 5/8 .....	2	2	
29	1013876	Nut, Push, 3/8 .....	1	1	
30	1013870	Pad, Park Brake .....	1	1	
31	1242	Nut, Hex, 5/16-18 .....	1	1	

**4**  
**G**  
**E**



## ACCELERATOR PEDAL ASSEMBLY

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY	QTY	<b>4</b>
			GAS	ELEC	
		<b>1 2 3 4</b>			<b>G</b>
1	1017696	Sub-Assembly, Accelerator Pedal (includes items 2 and 3) .....	1	1	<b>E</b>
2	1013871	Pad, Accelerator Pedal .....	1	1	
3	7716	Screw, Slotted Hex Washer-Head, #10-16 x 1/2 .....	4	4	
4	1624	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 1-1/2 .....	1	1	
5	334	Washer, Flat, 3/8 .....	2	2	
6	102026001	Kit, Accelerator Pivot Rod (includes item 7) .....	1	1	
7	1011700	Spacer .....	1	1	
8	101818801	Stud, Ball (for all vehicles except those equipped with MCOR) .....	1	1	
9	101862001	Screw, Hex-Head Cap, 1/4-20 x 1-3/8 (MCOR vehicles) .....		1	
10	1017424	Bearing, Pivot Support .....	1	1	
11	101966901	Nut, Flange, 1/4-28 .....	1	1	
12	101817401	Retainer, Spring .....	1	1	
13	101796201	Spring, Return .....	1	1	
14	1017378	Cup, Spring .....	1	1	
15	1017380	Bumper, Return Spring .....	1	1	
16	1241	Washer, Flat, 5/16 .....	1	1	
17	7473	Nut, Nylon Lock, 5/16-18 .....	1	1	
18	101871901	Assembly, Accelerator Rod (V-Glide 36-Volt vehicle only) (includes items 19 and 20) .....		1	
18	101912401	Assembly, Accelerator Rod (gasoline vehicle only) (includes items 19 and 20) .....	1		
19	1011084	Nut, UNF Hex Jam, 1/4-28 .....	2	2	
20	1011734	Joint, Spring-Loaded Ball .....	2	2	
21	8754	Nut, Nylon Lock, 3/8-16 .....	2	2	
22	8233	Nut, Nylon Lock, 1/4-20 .....	4	4	
23	1014007	Washer, Flat, Type B, 1/4 .....	4	4	
24	1011694	Support, Accelerator Pivot Rod .....	2	2	
25	101861901	Screw, Hex-Head Cap, 1/4-20 x 1-1/8 .....	4	4	
	101187702	Kit, Park Brake Latch (includes item 26, and items 18 - 22 on page 4-5) ..	1	1	
26	N/A	Ratchet, Park Brake .....	1	1	



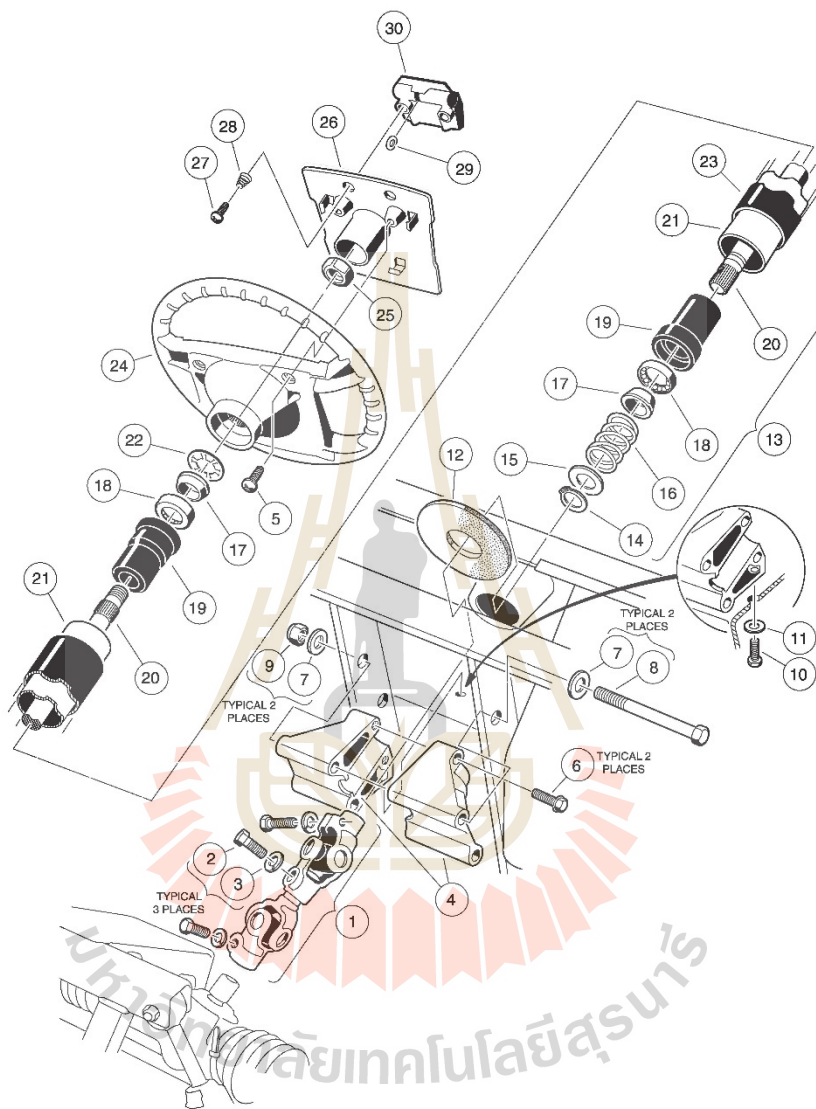
ภาคผนวก ข

กติกาพวงมาลัยของรถกอล์ฟ Club car DS 2005

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



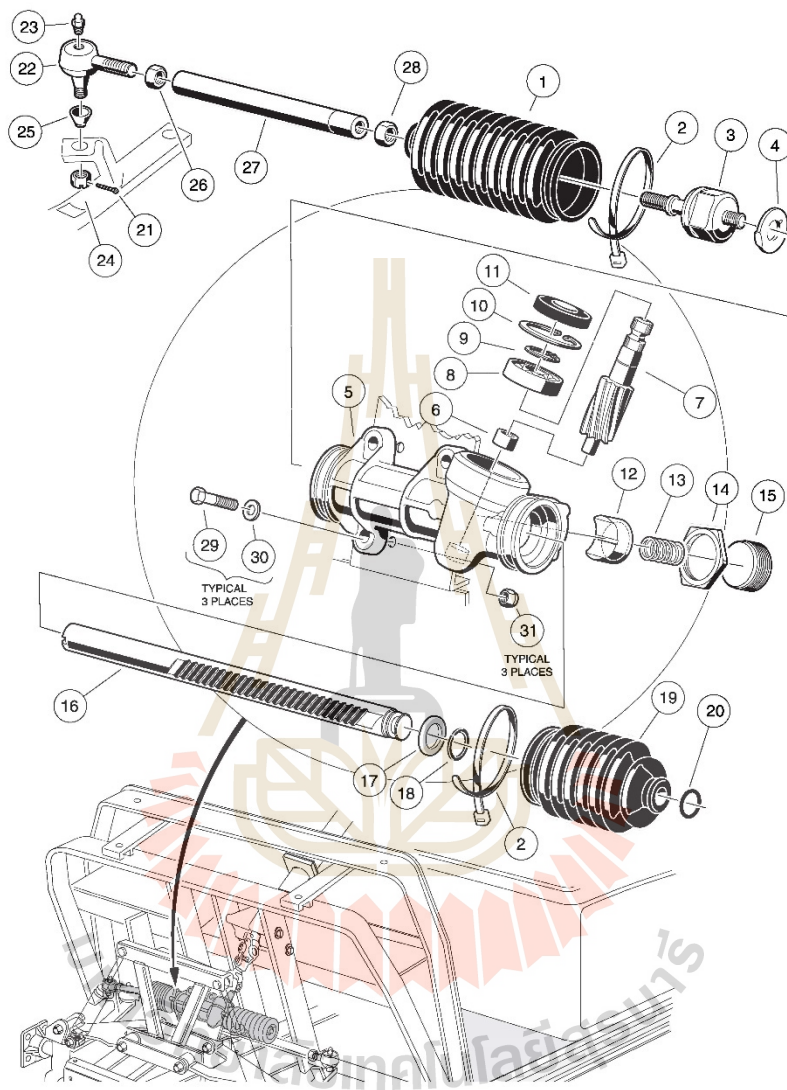
**5**  
**G**  
**E**



## STEERING COLUMN

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY	QTY	5
			GAS	ELEC	
		<b>1 2 3 4</b>			G
1	1013861	Joint, Compound Steering (includes items 2 and 3) .....	1	1	E
2	1017226	Screw, Hex-Head Cap, M8 x 1.25 x 30 mm .....	3	3	
3	7174	Washer, Lock, 5/16 .....	3	3	
4	101984801	Kit, Steering Column Mounting Bracket .....	1	1	
5	1016663	Screw, Phillips, Type A, #12-11 x 5/8 .....	2	2	
6	1016269	Screw, Hex Washer-Head Thread-Forming, 5/16-18 x 2 .....	2	2	
7	334	Washer, Flat, 3/8 .....	4	4	
8	1016183	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 7 .....	2	2	
9	8754	Nut, Nylon Lock, 3/8-16 .....	2	2	
10	1014288	Screw, Hex Washer-Head Thread-Forming, 5/16-18 x 3/4 .....	1	1	
11	1011697	Washer, Flat, 5/16 .....	1	1	
12	102278001	Boot, Steering Column .....	1	1	
13	1016181	Assembly, Steering Column (includes items 14 - 22) .....	1	1	
14	1012605	Ring, Retaining .....	1	1	
15	1012604	Washer, Steel, 5/8 .....	1	1	
16	1014217	Spring, Compression .....	1	1	
17	1014125	Wedge .....	2	2	
18	1014213	Assembly, Bearing .....	2	2	
19	1014126	Seat, Bearing .....	2	2	
20	1015545	Shaft, Steering Column .....	1	1	
21	1016622	Column, Aluminum Steering .....	1	1	
22	1014214	Ring, Retaining .....	1	1	
23	1016263	Cover, Steering Column .....	1	1	
24	1016156	Wheel, Steering .....	1	1	
25	1017273	Nut, Nylon Lock, 5/8-18 .....	1	1	
26	1016219	Assembly, Scorecard Plate (includes items 27 - 30) .....	1	1	
27	1012565	Screw, Round-Head, #12-14 x 1 .....	2	2	
28	1012566	Spring, Tapered Compression .....	2	2	
29	1016214	Grip, Pencil .....	1	1	
30	1016154	Clip, Scorecard .....	1	1	
	1014216	Kit, Steering Column Rebuild (not shown) .....	A/R	A/R	

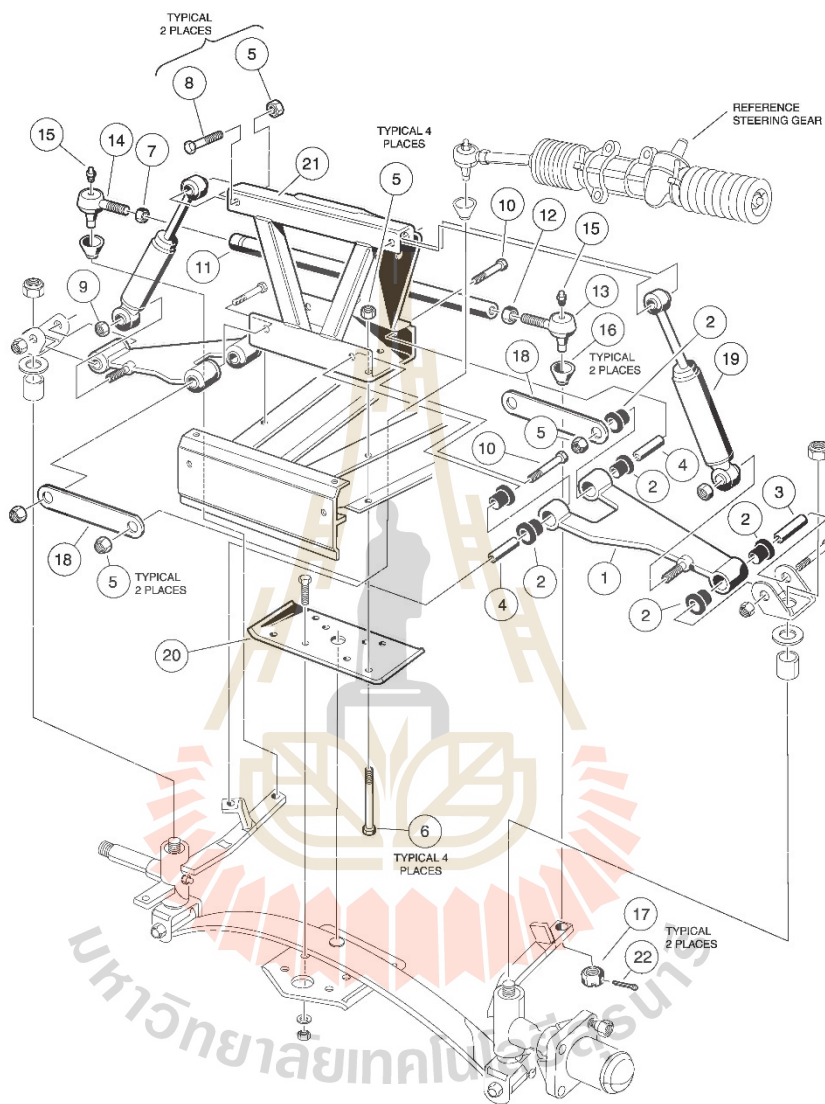
**5**  
**G**  
**E**



## STEERING GEAR ASSEMBLY

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY	QTY	5
			GAS	ELEC	
		<b>1 2 3 4</b>			G
	101878302	Assembly, Steering Gear Box (includes items 1 - 20) .....	1	1	E
1	1013035	Seal, Dust, Passenger-Side .....	1	1	
2	8990	Tie, Wire .....	2	2	
3	101880201	Assembly, Inner Ball Joint .....	1	1	
4	101880301	Washer, Tab .....	1	1	
5	N/A	Box, Steering Gear .....	1	1	
6	N/A	Bearing, Lower Pinion .....	1	1	
7	N/A	Pinion, Steering .....	1	1	
8	101879401	Bearing, Upper Pinion .....	1	1	
9	101879901	Ring, C-Type Stop .....	1	1	
10	1013051	Ring, Snap .....	1	1	
11	1013052	Seal, Dust, Steering Pinion .....	1	1	
12	101879701	Guide, Steering Rack .....	1	1	
13	101879801	Spring, Yoke .....	1	1	
14	1013044	Nut, Lock, Rack Screw .....	1	1	
15	N/A	Screw, Rack Guide .....	1	1	
16	N/A	Rack, Steering .....	1	1	
17	101879501	Washer, Stop .....	1	1	
18	101879601	Ring, C-Type Stop .....	1	1	
19	101880001	Seal, Dust, Driver-Side .....	1	1	
20	101880101	Ring, Retaining .....	1	1	
21	1035	Pin, Cotter, 3/32 x 1 .....	1	1	
22	7540	Ball Joint, Left-Hand Thread (includes items 23, 24 and 25) .....	1	1	
23	1015597	Fitting, Thread-Forming Grease, 1/4-28 .....	1	1	
24	7602	Nut, Hex Slotted, 3/8-24 .....	1	1	
25	1011930	Boot, Dust .....	1	1	
26	7555	Nut, Hex, Left-Hand Thread, 1/2-20 .....	1	1	
27	1012467	Link, Rack and Pinion Drag .....	1	1	
28	1013042	Nut, Hex, M12 x 1.75 .....	1	1	
29	1624	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 1-1/2 .....	3	3	
30	334	Washer, Flat, 3/8 .....	3	3	
31	8754	Nut, Nylon Lock, 3/8-16 .....	3	3	

**5**  
**G**  
**E**



### FRONT SUSPENSION, UPPER

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY GAS	QTY ELEC	5 G E
		1 2 3 4			
1	1016353	Assembly, Delta A-Plate (includes items 2, 3 and 4) .....	2	2	
2	1016346	Bushing, Urethane .....	6	6	
3	1016350	Sleeve, Delta Outer .....	1	1	
4	1016349	Sleeve, Delta Inner .....	2	2	
5	8754	Nut, Nylon Lock, 3/8-16 .....	10	10	
6	1010200	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 4-1/4 .....	4	4	
7	1308	Nut, Hex, 1/2-20 .....	1	1	
8	8861	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 1-3/4 .....	2	2	
9	1624	Nut, Dimpled Lock, 3/8-16 .....	2	2	
10	2402	Screw, Hex-Head Cap, 3/8-16 x 2-1/4 .....	4	4	
11	1010219	Rod, Tie .....	1	1	
12	7555	Nut, Hex, Left-Hand Thread, 1/2-20 .....	1	1	
13	7540	Ball Joint, Left-Hand Thread (includes items 15, 16 and 17) .....	1	1	
14	7539	Ball Joint (includes items 15, 16 and 17) .....	1	1	
15	1015597	Fitting, Thread-Forming Grease, 1/4-28 .....	1	1	
16	1011930	Boot, Dust .....	1	1	
17	7602	Nut, Slotted Hex, 3/8-24 .....	1	1	
18	1017266	Strap, A-Plate .....	2	2	
19	1014235	Shock Absorber, Front .....	2	2	
20	1010124	Plate, Spring Mounting .....	1	1	
21	1016385	Assembly, Delta Shock and Gear Support .....	1	1	
22	1035	Pin, Cotter, 3/32 x 1 .....	3	3	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

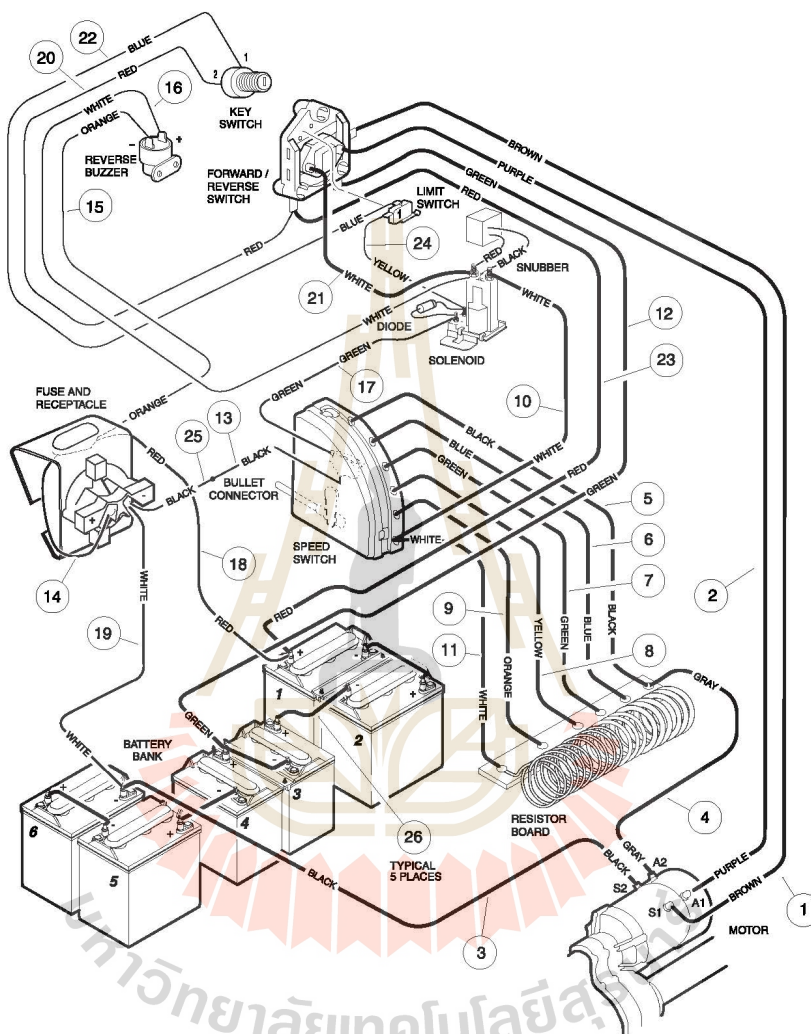


ภาคผนวก ค

วงจรของรถกอล์ฟ Club car DS 2005

12

E





### WIRING – V-GLIDE 36-VOLT VEHICLE

ITEM	PART NO.	DESCRIPTION	QTY
		1 2 3 4	
1	1016070	Wire Assembly, #6 Brown .....	1
2	1016069	Wire Assembly, #6 Purple .....	1
3	1012651	Wire Assembly, #6 Black .....	1
4	1016068	Wire Assembly, #6 Gray .....	1
5	1014036	Wire Assembly, #6 Black, 6th Speed .....	1
6	1014035	Wire Assembly, #6 Blue, 5th Speed .....	1
7	1014034	Wire Assembly, #6 Green, 4th Speed .....	1
8	1014033	Wire Assembly, #6 Yellow, 3rd Speed .....	1
9	1014032	Wire Assembly, #6 Orange, 2nd Speed .....	1
10	1014029	Wire Assembly, #6 White .....	1
11	1014030	Wire Assembly, #6 White, 1st Speed .....	1
12	1014828	Wire Assembly, #6 Green .....	1
13	N/A	Wire Assembly, #18 Black .....	1
14	1013092	Wire Assembly, #10 Red .....	1
15	N/A	Wire Assembly, #18 Orange .....	1
16	N/A	Wire Assembly, #18 White .....	1
17	N/A	Wire Assembly, #18 Green .....	1
18	102018001	Wire Assembly, #10 Red .....	1
19	1011010	Wire Assembly, #10 White .....	1
20	N/A	Wire Assembly, #18 Red .....	1
21	1014039	Wire Assembly, #6 White .....	1
22	N/A	Wire Assembly, #18 Blue .....	1
23	1011069	Wire Assembly, #6 Red .....	1
24	N/A	Wire Assembly, #18 Yellow .....	1
25	N/A	Wire Assembly, #18 Black .....	1
26	1010958	Wire Assembly, #6 Black .....	5

12

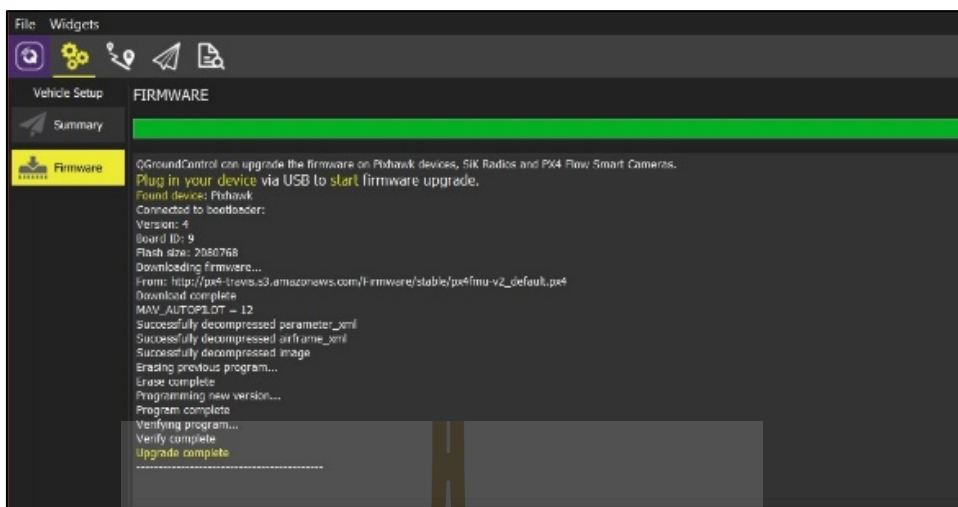
E



ภาคผนวก ง

การใช้โปรแกรม QGround control

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

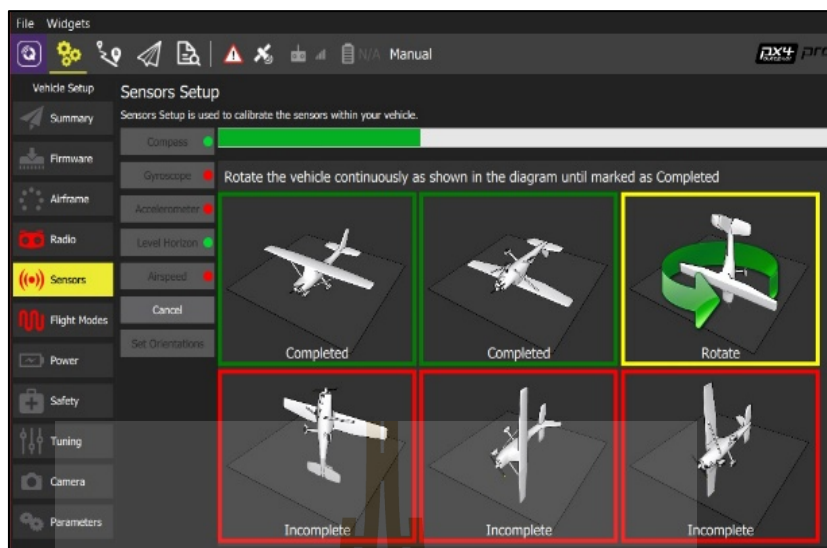


รูปที่ ง.1 การกำหนด Firmware เป็น Firmware Version 1.6.5



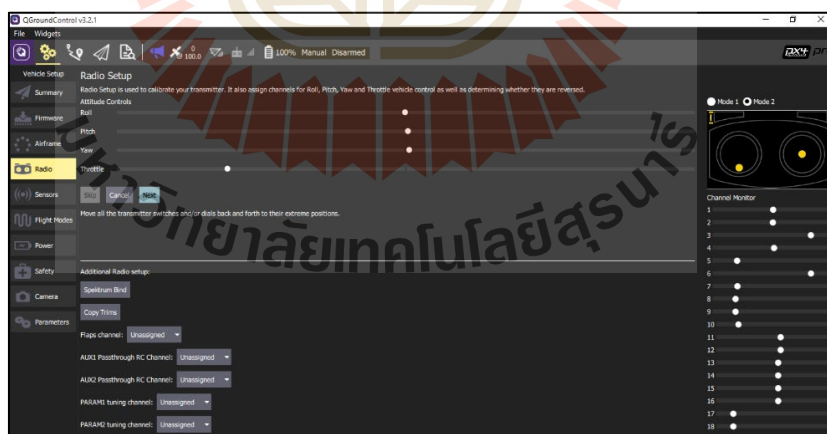
รูปที่ ง.2 การเลือก Airframe ให้ตรงกับอุปกรณ์

การทดสอบจะกำหนด Airframe เป็น Rover แบบ Traxxas Stampede v1 2wd โดยการเลือก Airframe จะต้องเลือกให้ตรงกับอุปกรณ์ที่จะทดสอบ



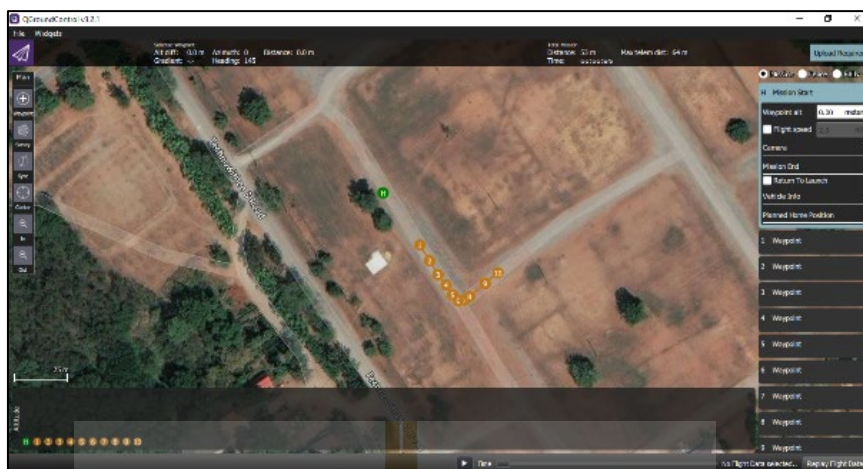
รูปที่ 3.3 Calibration sensor

การ Calibration sensor จะแบ่งออกเป็น 4 อย่าง คือ Compass, Gyroscope, Accelerometer และ Level Horizon ซึ่งการ Calibrate จะทำตามรูปที่ 3.6 โดยเริ่มจากวงบอร์ด Pixhawk ที่แสดงบนโปรแกรม และหมุนทิศทางบอร์ดตามที่โปรแกรมกำหนด จนครบทุกการ Calibration



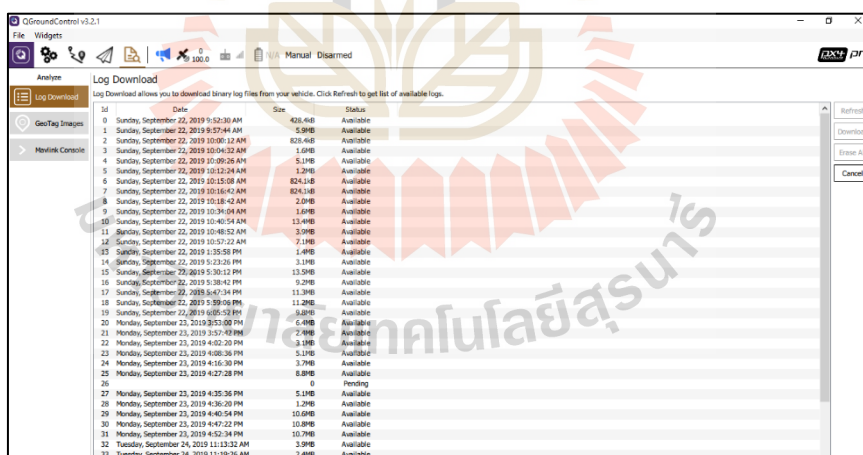
รูปที่ 3.4 Calibration remote

การสอบเทียบรีโมทจะกดเข้าไปที่ Radio เพื่อทำการสอบเทียบ การสอบเทียบจะเคลื่อน Sticks ตามที่โปรแกรมแสดงบนหน้าจอ



รูปที่ 3.5 การสร้าง Setpoint

การสร้าง Setpoint ในการทดสอบจะ Set Altitude เป็น 0 เมตร เพราะเป็นการทดสอบพื้นที่ที่ไม่มี ความสูง และจะ ไม่มีการ Set Takeoff ซึ่งการกำหนด Set Point จะทำให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้จีพีเอสได้



รูปที่ 3.6 Datalogger

การ Download datalogger จากโปรแกรมให้เข้าไปที่ log download เพื่อนำข้อมูลมมา ปัญหาและปรับจูนค่า PID Control

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Phetnok, P., Lonklang, A., & Tantrairatn, S. (2019). Implementation of Steering-by-Wire Control System for Electric Golf Cart. 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR).



## Implementation of Steering-by-Wire Control System for Electric Golf Cart

Panithi Phetnok, Aphilak Lonklang, Suradet Tantrairatn

School of Mechanical Engineering

Institute of Engineering

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province 30000

e-mail: panithi.ph@gmail.com, aphilak@sut.ac.th, suradetj@sut.ac.th

**Abstract**—This paper aims to modify electric golf cart, in the mechanical parts of the steering mechanical system for adaptation to drive-by-wire. A DC motor with digital encoder based on feedback control was utilized to activate the steering of golf cart by microcontroller (Arduino UNO). However, to accomplish the accuracy of the particular control system, the process of system identification, which is the estimation of the parameters of the mathematic model, is essential. The measurement of inputs and outputs during activating pulse width modulation input in sweep frequency form is employed to determine the unknown parameters of SISO mathematical model using a system identification using least-square method from frequency responses via software package Comprehensive Identification from Frequency Response (CIFER). Consequently, the obtained model is utilized for an optimization-based tuning of these PID controller gains offline in order to achieve the requirement of control design with Simulink. Finally, these PID controller gains was implemented for the feedback control system of the drive-by-wire system that mentioned. Performance of the proposed method can obtain the good quality of control performance as requirement.

**Keywords**—component; drive-by-wire; steering-by-wire; system identification; frequency response; PID control design; arduino

### I. INTRODUCTION

Drive-by-wire technology in the automotive industry is the use of actuator and sensor for performing vehicle functions traditionally achieved by mechanical linkages to reducing load from the friction of mechanism and increase driving performance of a vehicle. This technology replaces the traditional mechanical control systems with electronic control module using electromechanical actuators and human-machine interfaces such as pedal and steering feel emulators [1]. The electric golf cart has a component like a car but it's not complicated and low-cost to research and develop control system, a servo motor and microcontroller will be added into steering system for drive-by-wire system improve to autonomous vehicle [2].

For the control system design, the mathematical model is important to analyze the performance, predict the behavior of vehicle and design controllers. System identification is a methodology to determine a vehicle equation of motion using input and output measured data signals from the real vehicle [3]. There is one research that apply the system identification to DC motor in frequency domain. This

method needs to collect the measured voltage input and angle with an encoder and convert signal in time domain to frequency domain before [4].

Comprehensive Identification from Frequency Response (CIFER) is a uniquely software package developed by Tischler et al. This software can utilize to identify mathematical model in transfer function and state-space form. There are many tools for comprehensive analysis of aircraft dynamic in frequency response. This software has been identifying a helicopter UAV model [5]. Although CIFER software is mainly used for helicopters, many researches have also implemented this software with fixed-wing UAV [6-7]. There are some literatures that applied CIFER to determine transfer function and then use the obtained function to design controller gains for fixed-wing Tailless UAV [8] and quadcopter UAV [9].

Therefore, this paper presents an implementation of steering-by-wire control design. This practical method consists of two processes such as system identification and steering-by-wire control design. Firstly, the system identification in frequency domain using CIFER utilizes to find transfer function of golf cart in steering dynamics by collecting frequency sweep input in PWM form and output of wheel angle (encoder). After that, the obtained transfer function was employing to design a PID controller system. In section II the golf cart and hardware for steering-by-wire system are explained. How to find transfer function via CIFER and verify a model response with real dynamic system is described in section III. Steering-by-wire control system is designed using a local optimization in MATLAB/Simulink to find PID controller gains in section IV. Results of system identification are presented in section V and control optimization results compare between optimized PID controller and gains with default in section VI. Finally, the summary is concluded in Section VII.

### II. HARDWARE OVERVIEW

#### A. Golf Cart Club Car DS 2005

Electric golf cart DS 2005 has a fully mechanical control system without electronic control box, especially steering control system. It is equipped with a wiper switch for throttle control, drum brake in rear wheels, rack and pinion for steering control, 36Vdc electric motor and batteries.





Figure 1. Club car DS 36Vdc.

**B. Motor 24Vdc and MD30C Cytron Drive Module**

24Vdc 30W motor is used for driving cart with PWM signal. MD30C drive module that is H-bridge circuit, utilize to control supply voltage, for motor. The drive module is connected with Arduino in order to command a mount of voltage. The motor is linked with pulley on steering wheel rod.

**C. Incremental Rotary Encoder 400P/R**

Incremental photoelectric rotary encoder generates A, B two-phase orthogonal pulse signal though the rotation of the grating disk and optocoupler. 400 pulses/round for each phase, and 1600 pulses/round for dual-phase 4 times output. This rotary encoder supports maximum of 5000 rpm speed. Additionally, it can be used for angle and angular velocity



Figure 2. Motor with encoder on steering system.

**D. Arduino UNO**

Arduino UNO is a microcontroller that has the clock speed 16MHz. This microcontroller is used to read encoder with an interrupt function on pin 2,3. Furthermore, the Arduino was set to read a data with sample time of 0.005 second to collect data by timer library. Moreover, the module is also employed to calculate a feedback control for read position and command PWM to the drive module shown in figure 3.

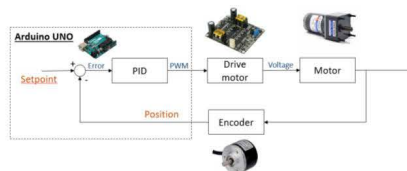


Figure 3. Close loop control position motor with PID.

**III. SYSTEM IDENTIFICATION**

To determine a model of drive-by-wire system, PWM input is used to regulate the voltage for motor in form of sweep frequency signal. The sweep frequency input defines at minimum frequency 0.4 Hz and maximum 5 Hz. Furthermore, a steering angle output is measured by encoder in time-domain

$$k = (f_1 - f_0) / T \tag{1}$$

$$x(t) = \sin [ 2\pi ( f_0 t + 0.5kt^2 ) ] \tag{2}$$

where  $f_1$  is the final frequency.

$f_0$  is the starting frequency.

T is the time it takes to sweep from  $f_0$  to  $f_1$ .

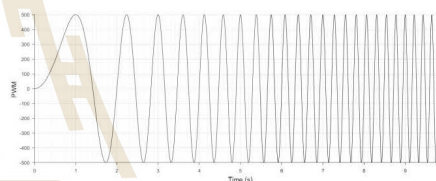


Figure 4. Sweep input is at amplitude of 2.5 volts in frequency 0.4-5 Hz.

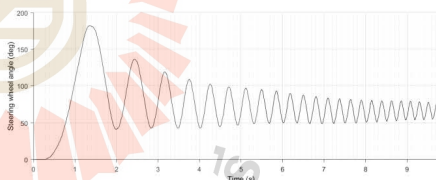


Figure 5. Steering wheel angle response measured by encoder.

The time-history sweep input and steering wheel angle output data will be processed by CIFER to analyze the SISO model in frequency response with chirp-z transform. The chirp-z transform has an advantage to eliminate potential aliasing of high-frequency noise. After filtered noise, the data will be sent to COMPOSITE module for optimizing multiple spectral windows to achieve the final frequency

response with good resolution and low random error. The mentioned result from COMPOSITE was used to find a transfer function model by NAVFIT. The model base on low-order equivalent system. Then coherence value that is more than 0.6, has been accepted [10]. Cost function value is lower than 100 to be a good identified model [8-9].

IV. OPTIMIZATION BASED TUNNING

From the section III, the obtained transfer function is utilized to design a controller in order to meet a requirement as shown in figure 7. Therefore, Optimization MATLAB/Simulink toolbox is applied to tuning PID controller gains with block diagram as illustrated in Fig. 6. Gain tuning is required to consider a cause jerking that can be make a damage to actuator. Therefore, an initial condition of gain must be set carefully in the same as minimum and maximum value as shown in Table I.

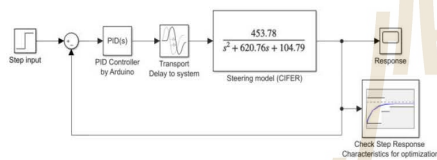


Figure 6. Steering actuator control loop.

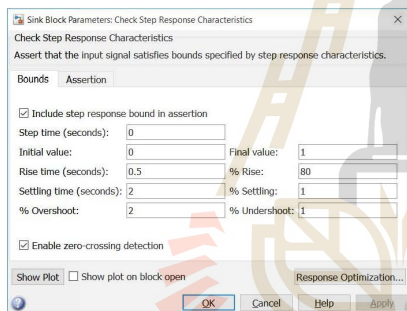


Figure 7. Controller requirement.

TABLE I. GAIN CONTROLLER BOUNDS

Gain	Initial condition	Min	Max
Kp	0,5	0.5	30
Ki	0	0	1
Kd	0	0	1

V. SYSTEM IDENTIFICATION RESULTS

As illustrate in figure 8, steering wheel angle response in frequency range 0-4 Hz that has a coherence value more than 0.6, are accepted and achieve close to 1 at frequency 1-3 Hz. Transfer function G(s) in equation 3 has an excellent result with a cost function value of 16.378 as demonstrate in figure 8. The transfer function is in form of second order and has a time delay of 0.0202 second.

$$G(s) = \frac{453.78 e^{-0.0202s}}{s^2 + 620.76s + 104.79} \quad (3)$$

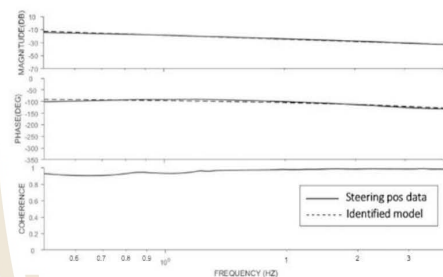


Figure 8. Steering frequency response identified model.

A. Model Verification

After system identification process, a model response was compared with a real cart response with activated steering wheel actuator with joystick input. This process required to check the accuracy of mathematical model. The result shown that a steering control response from the identified model is close to the real golf cart response.

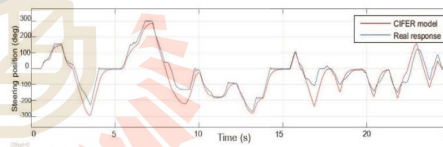


Figure 9. Time-domain model varification.

VI. OPTIMIZATION RESULTS

From the section IV, the transfer function was utilized to design the controller gain using optimization MATLAB/Simulink toolbox. The control performance requirement was defined as shown in figure 7. The result shown that the response has a rise time of 0.146 s without overshoot and it can tack the command to steady state faster than requirement. This controller gains were Kp of 24.92, Ki of 0.0098 and Kd of 0.2701.

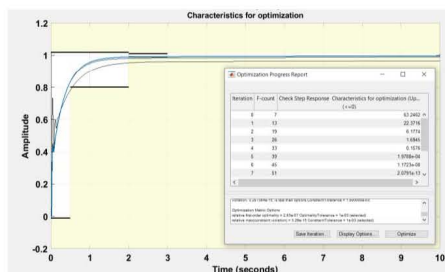


Figure 10. Steering tuning constrain.

From figure 11, response close loop control steering wheel angle output was measured without gain was not good observe from error, while put gain PID into system via Arduino in Fig. 12 response comparing between input and output are track on set point without overshoot and stable in system though have small error

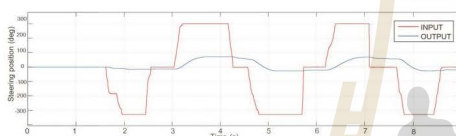


Figure 11. Steering actuator response without gain.

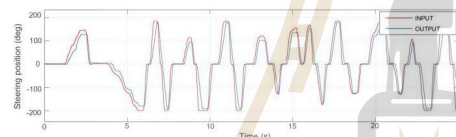


Figure 12. Steering actuator response for the optimized controller gain.

VII. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This paper presented the off-line controller tuning technique based on using a transfer function that obtained from system identification by CIFER software. The controller gains are achieved by the local optimization on MATLAB control system designer toolbox. The steering

control results illustrated excellent result that can track the set-point/command and reject the disturbance along with numerous benefits such as decreasing time consuming during the controller gain tuning and reducing the chance from driver error due to repetition.

In future work, this technique is going to develop to the fully drive-by-wire system by adding brake system and acceleration system or throttle system. Then this work will continue to advance into an autonomous vehicle system

REFERANCES

- [1] V.Milanés, J.Pérez, E.Onieva, C.González and T. de Pedro, "Electric power controller for steering wheel management in electric cars," in *Compatibility and Power Electronics (CPE)*, vol. 1, May 2009, pp. 444-449.
- [2] S.Pendleton et al, "Autonomous Golf Cars for Public Trial of Mobility-on-Demand Service", *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct 2015, pp.1165-1171:IEEE.
- [3] S. Manasa, S. Rani.T and M. Veda chary, "Position control of a dc motor using PID controller," *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJEAS)*, vol. 1, June 2015, pp. 436-442.
- [4] I.F. Okuyama, Marcos R. O. A. Maximo And Samuel C. Pinto "System identification of a hobby dc motor using a low cost acquisition setup" *Brazilian Symposium on Intelligent Automation (SBIA)*, October 2015, Rio Grande do Norte (UFRN).pp. 1125-1130.
- [5] Mark B. Tischler and Robert K. Remple, *Aircraft and Rotorcraft System Identification Engineering Methods with Flight Test Examples*. AIAA education series, 2006.
- [6] Parth Kumar and James E. Steck, "System Identification, HIL and Flight Testing of an Adaptive Controller on a Small Scale Unmanned Aircraft," *Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Jan. 2015, doi:10.2514/6.2015-1803
- [7] Eric Tobias, Mark Tischler, Tom Berger, and Steven G. HageroU. "Full Flight-Envelope Simulation and Piloted Fidelity Assessment of a Business Jet Using a Model Stitching Architecture," *Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Jan. 2015, doi: 10.2514/6.2015-1594.
- [8] W. Saengphet, S. Tantrairath, C. Thumthac, and J. Srisertpol, "Implementation of system identification and flight control system for UAV," in *Control Automation and Robotics (ICCAR)*, 2017, pp. 678-683. doi: 10.1109/ICCAR.2017.7942783
- [9] S. Sakulthong, S. Tantrairath and W. Saengphet "Frequency response system identification and flight controller tuning for quadcopter UAV" in *Engineering Science and Innovative Technology (ESIT)* , April 2018.
- [10] Nathan V. Hoffer, Calvin Coopmans, Austin M. Jensen, and YangQuan Chen, "A Survey and Categorization of Small Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle System Identification," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 74, April 2014, pp 129-145, doi: 10.1 007/s1 0846-013-9931-6.

## ประวัติผู้เขียน

นายปณิธิ เพ็ชรนอก เกิดเมื่อวันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2537 ณ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมาและมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย หลังจากจบมัธยมศึกษาตอนต้นได้เข้าสู่วิทยาลัยเทคนิคสุรนารี เพื่อศึกษาในระดับชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพ โครงการเทคโนโลยีฐานวิทยาศาสตร์รุ่นที่ 1 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2560 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ณ มหาวิทยาลัยแห่งเดิม โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้โครงการพัฒนาบุคลากรทางด้านเครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

ในระหว่างการศึกษาได้ปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ และได้รับมอบหมายให้เป็นผู้สอนปฏิบัติการประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมการผลิต และวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ดังนี้

1. ระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม
2. ปฏิบัติการระบบควบคุมและอัตโนมัติ
3. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 1
4. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 2
5. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 3
6. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 4
7. ปฏิบัติการฟิสิกส์สำหรับวิศวกร 1
8. การวัดและเครื่องมือวัด
9. การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์