

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาและออกแบบระบบควบคุมสำหรับรถเคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากกระบวนการ System Identification รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบไว้ เปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างแบบจำลองและระบบจริง เพื่อยืนยันความสามารถในการควบคุมมอเตอร์และการนำทางของรถ นอกจากนี้ ยังนำเสนอผลการประเมินความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ ESP32 UWB DW1000 เพื่อสนับสนุนการนำทางอัตโนมัติ และผลการทำงานของระบบอัตโนมัติในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และการกลับเข้าสู่ตำแหน่งชาร์จพลังงานอัตโนมัติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบที่พัฒนาขึ้นในการทำงานจริงอย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 ความสามารถระบุตำแหน่งเซ็นเซอร์ ESP32 UWB DW1000

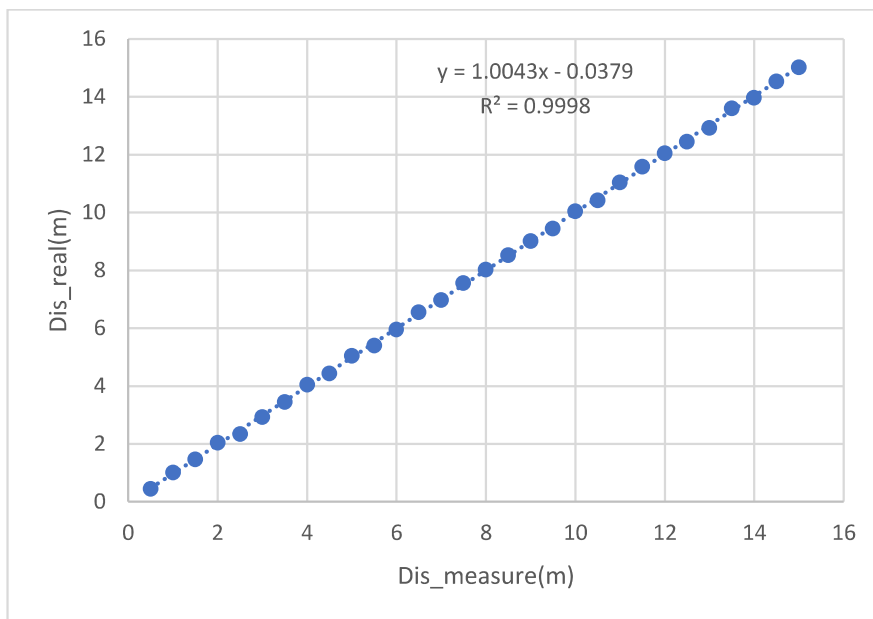
สำหรับส่วนที่ 1 ได้ทำการวัดค่าระยะทางตั้งแต่ 0.5 เมตร ถึง 15 เมตร โดยใช้ เซ็นเซอร์ ESP32 UWB DW1000 ตัวส่งสัญญาณจะวางไว้ที่ตำแหน่ง 0.5 เมตร และตัวรับสัญญาณจะขยับออกไปครั้งละ 0.5 เมตร จนถึง 15 เมตร ความสูงของตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณจะเท่ากันโดยใช้ความสูงที่ 0.5 เมตร ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การวัดเซ็นเซอร์ ESP32 UWB DW1000 ระหว่างจุด

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดระยะตัวรับและตัวส่งของเซ็นเซอร์

Actual distance (m)	Measured distance (m)	Actual distance (m)	Measured distance (m)
0.5	0.45	8	8.03
1	1.01	8.5	8.53
1.5	1.47	9	9.02
2	2.04	9.5	9.45
2.5	2.34	10	10.05
3	2.93	10.5	10.42
3.5	3.45	11	11.04
4	4.05	11.5	11.59
4.5	4.44	12	12.05
5	5.05	12.5	12.45
5.5	5.4	13	12.93
6	5.96	13.5	13.6
6.5	6.55	14	13.97
7	6.98	14.5	14.53
7.5	7.56	15	15.02
		AVG	7.745
Error Max (%)	10.0	Standard Deviation	4.421
Error Min (%)	0.13	Uncertainty	0.807



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบระยะจริงที่และค่าเซ็นเซอร์ที่วัดได้

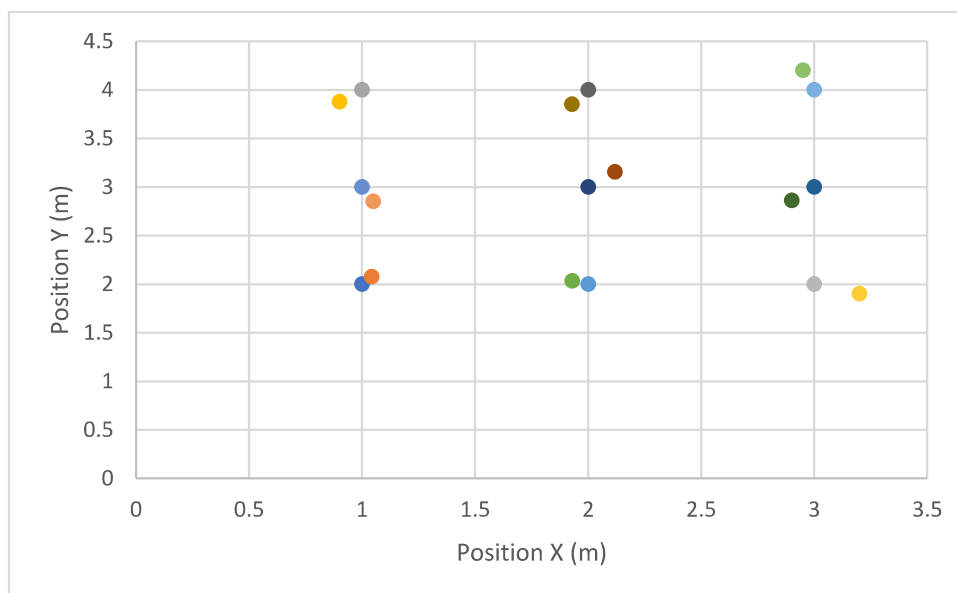
ส่วนที่ 2 ได้วัดตำแหน่งของรถในแต่ละตำแหน่งโดยใช้ตัวส่งสัญญาณ 4 ตัว จะวางไว้ที่ตำแหน่ง 0,0 4,0 0,8 และ 4,8 ตัวรับสัญญาณใช้ 1 ตัว จะไปวางยังตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ โดยตอนหาตำแหน่งจะใช้สัญญาณของตัวส่ง 3 ตัว จะเป็น 3 ตัวที่อยู่ใกล้กับตัวรับสัญญาณที่สุดมาคำนวณหาตำแหน่งดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ระบุตำแหน่งเซ็นเซอร์ ESP32 UWB DW1000

ตารางที่ 4.2 ผลการระบุตำแหน่งด้วยวิธี Trilateration

Actual Position (m)		Trilateration Position (m)		Error Position (m)
x	y	x	y	
1	2	1.04	2.07	0.087
1	3	1.05	2.85	0.158
1	4	0.90	3.88	0.157
2	2	1.92	2.03	0.077
2	3	2.11	3.15	0.195
2	4	1.92	3.84	0.166
3	2	3.20	1.90	0.224
3	3	2.90	2.86	0.172
3	4	2.95	4.20	0.206
Error Max (m)				0.224
Error Min (m)				0.077

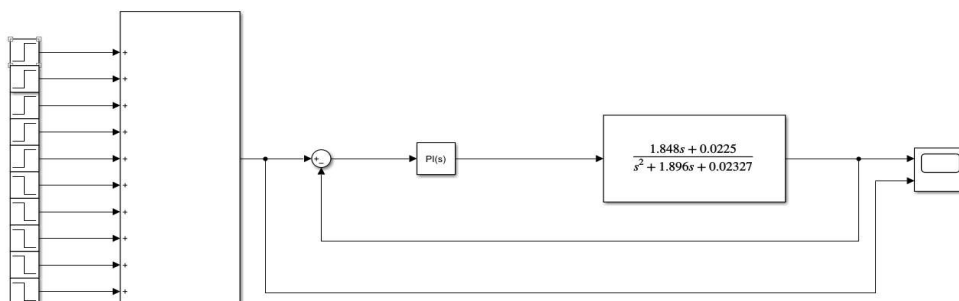


รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งจริงที่และค่าเซ็นเซอร์ที่วัดได้

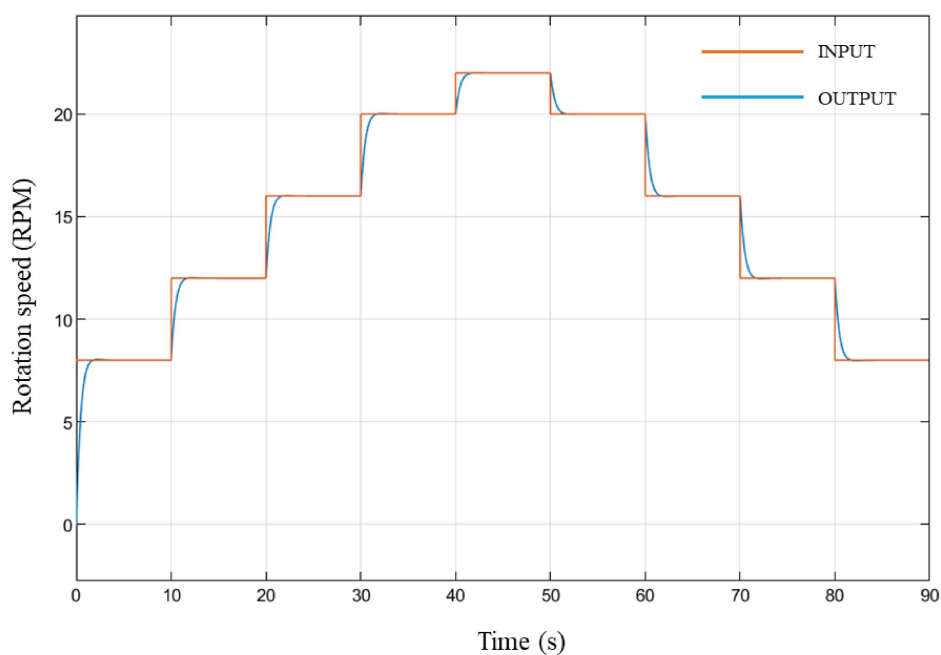
จากตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการวัดระยะทางของ ESP32 UWB DW1000 ทั้งสองตัวที่มีตัวรับและตัวส่ง R Square อยู่ที่ 0.998 และมีค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ 10% และค่าผิดพลาดที่น้อยที่ 0.13% จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ 10% เกิดที่ 0.5 เมตร ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ว่า 10% นั้นแปลงเป็นระยะทาง มีความคลาดเคลื่อนที่ 0.05 เมตร เป็นระยะที่ยอมรับได้และการรับส่งระหว่างสองตัวนั้นมีความแม่นยำ ส่วนที่ 2 ที่นำระยะทางทั้ง 3 ตัวของตัวส่งและตำแหน่ง มาคำนวณหาตำแหน่งของตัวรับจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ามีค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ 0.224 เมตร และค่าผิดพลาดที่น้อยที่ 0.077 เมตร เกิดค่าที่ผิดพลาดที่ในแต่ละตำแหน่งค่าที่ผิดพลาดเกิดจากการรับส่งสัญญาณนั้นมีความอ่อนไหวในการรับส่งอาจจะเกิดสิ่งรบกวนค่าจึงทำให้เกิดค่าที่ผิดพลาดของตำแหน่ง

4.3 ผลการทดสอบตัวควบคุม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ทำการออกแบบตัวควบคุม PI ที่ P มีค่า 1.15 ที่ I มีค่า 2.55 ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวควบคุมไปทดสอบใน Simulink ใน MATLAB ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการไม่มี overshoot แสดงในรูปที่ 4.8 และบล็อกไดอะแกรมในการทดสอบตัวควบคุมแสดงในรูปที่ 4.5

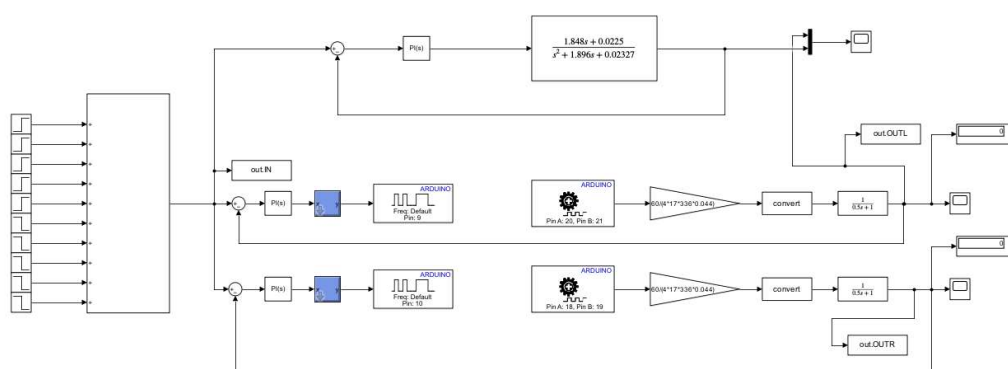


รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบตัวควบคุม

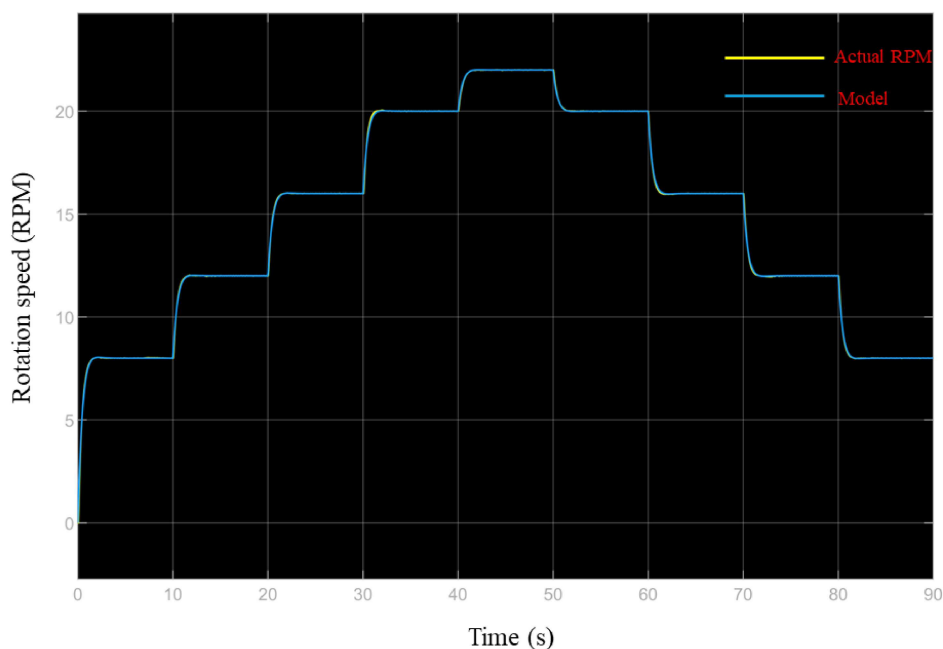


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของตัวควบคุม

หลังจากทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวควบคุมได้ทำการไปทดลองกับระบบจริงของรถพลิกกลับนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับใช้งานในโรงเลี้ยงไก่โดยใช้ Simulink ใน MATLAB สื่อสารอ่านค่าและเก็บค่า บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบตัวควบคุมในระบบจริงแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบตัวควบคุมในระบบจริง



รูปที่ 4.8 Step response and system performance with PI-Controller (Simulation vs real system)

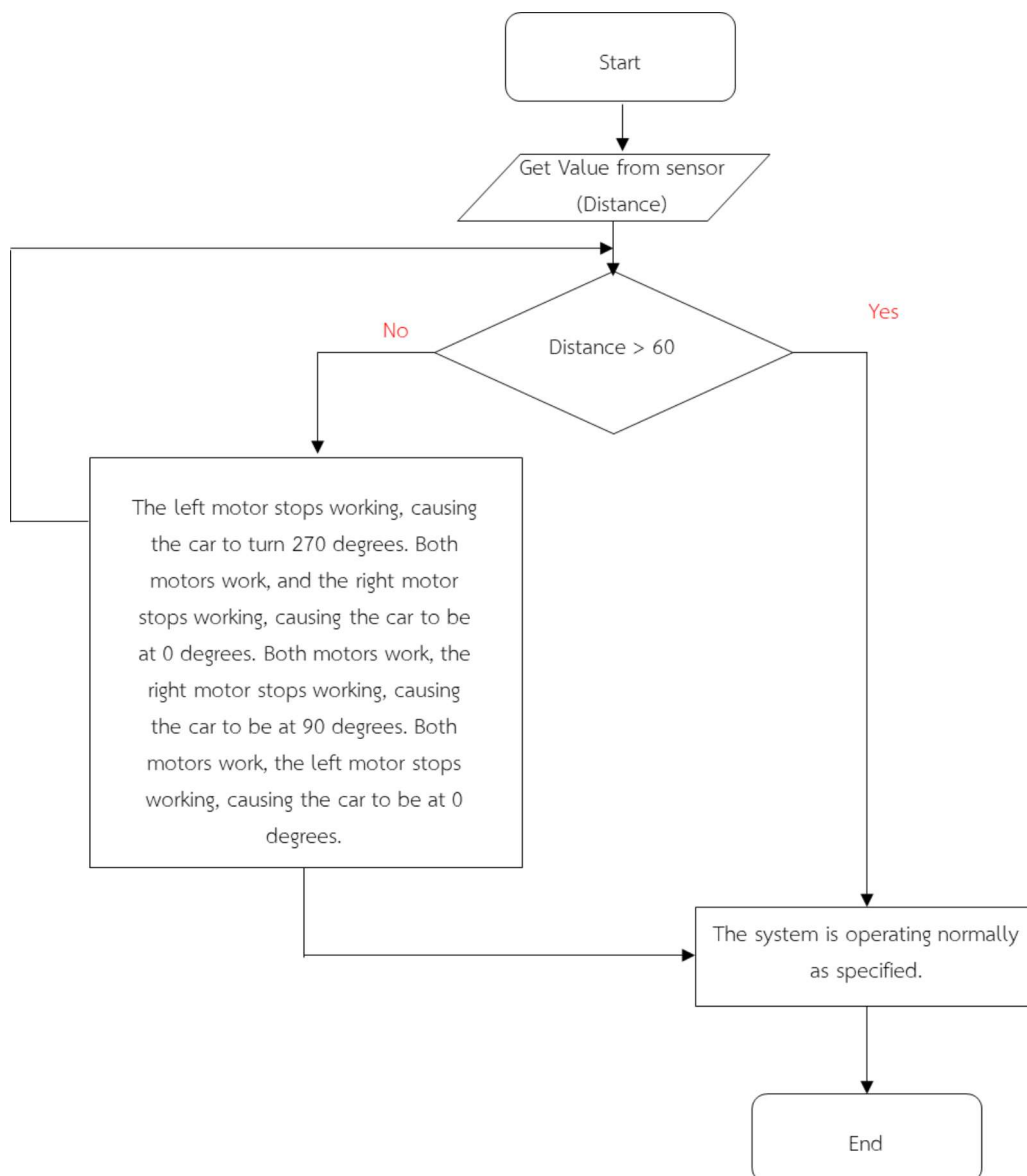
จากรูปที่ 4.8 ได้ทำการกำหนดความเร็วรอบที่ 8 rpm ถึง 22 rpm แล้วลดจาก 22 rpm เหลือ 8 rpm ดูการตอบสนองของระบบที่ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบจริงที่มีตัวควบคุม PI ให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการในการควบคุมรถ จากผลตอบสนองจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับระบบจริงและตัวควบคุมที่ออกแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพและไม่มี overshoot

4.4 ผลการออกแบบระบบทำงานอัตโนมัติ

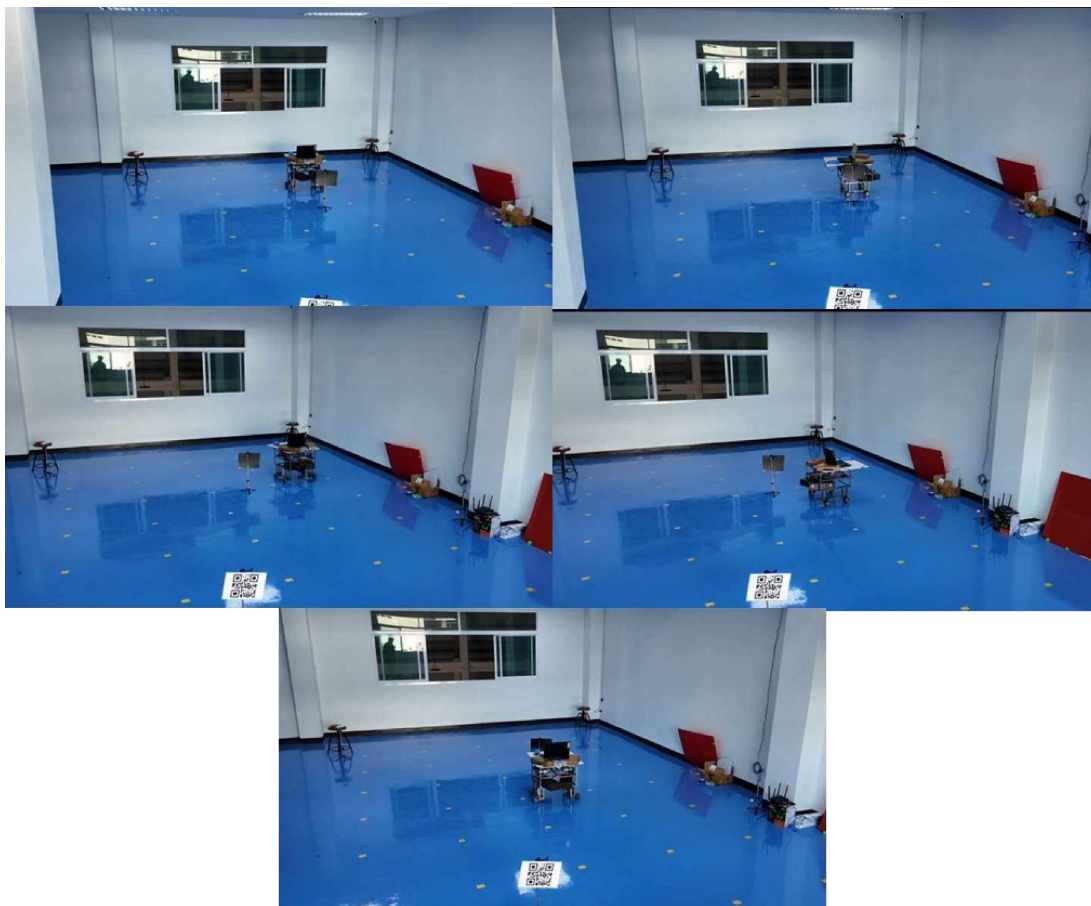
แบ่งออกด้วยกัน 2 ระบบ 1.ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและ 2.ระบบตรวจสอบแบตเตอรี่

4.4.1 ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

โดยจะใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยถ้าตรวจเจอสิ่งกีดขวางจะให้รถหันซ้ายที่มุม 90 องศา แล้วให้รถตรงไปให้พ้นระยะของตัวรถแล้วทำการเลี้ยวขวามาที่ 90 องศา แล้วให้รถตรงไปให้พ้นสิ่งกีดขวางแล้วให้รถกลับมายังเส้นทางเดิมดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



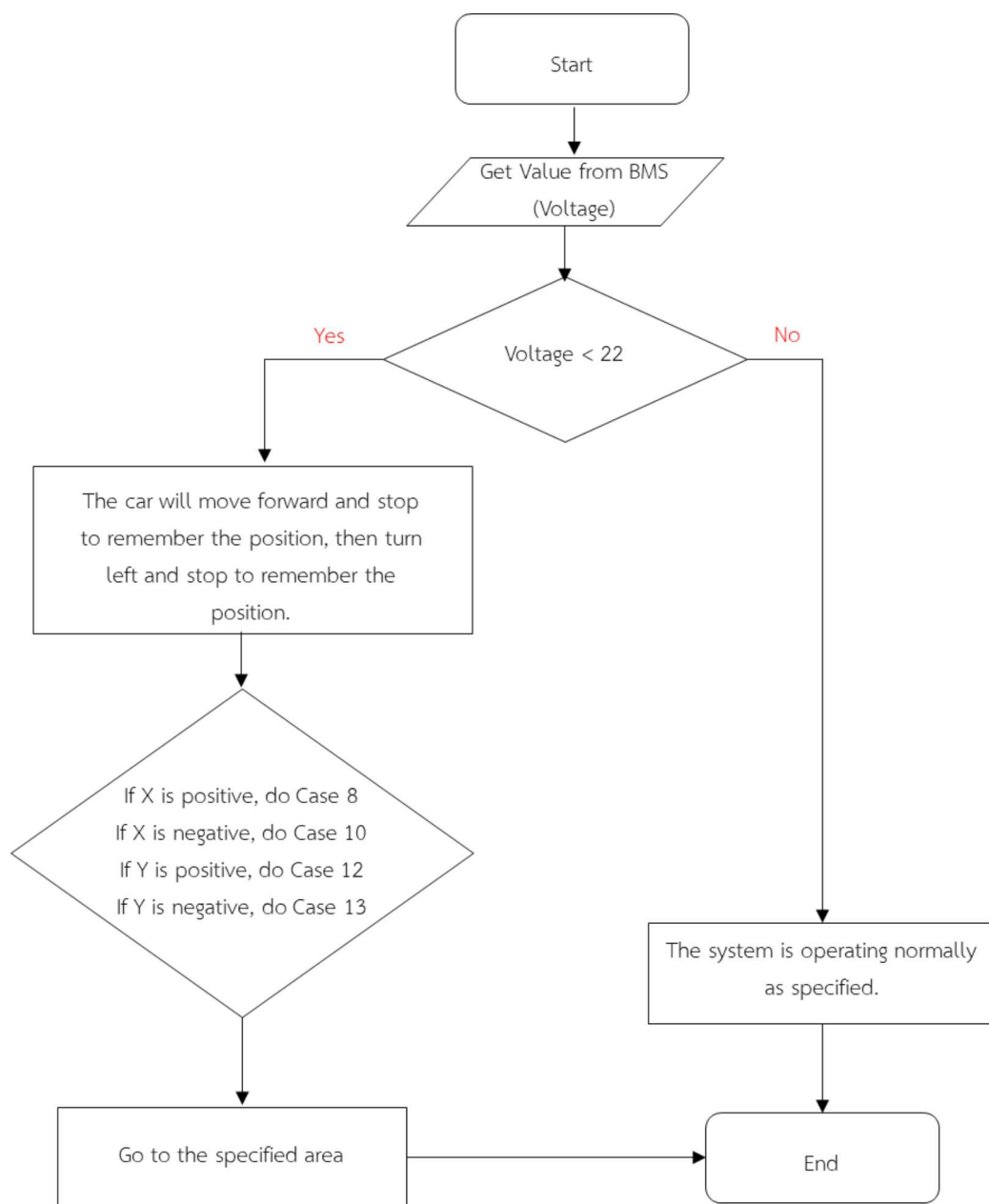
รูปที่ 4.9 แผนผังระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง



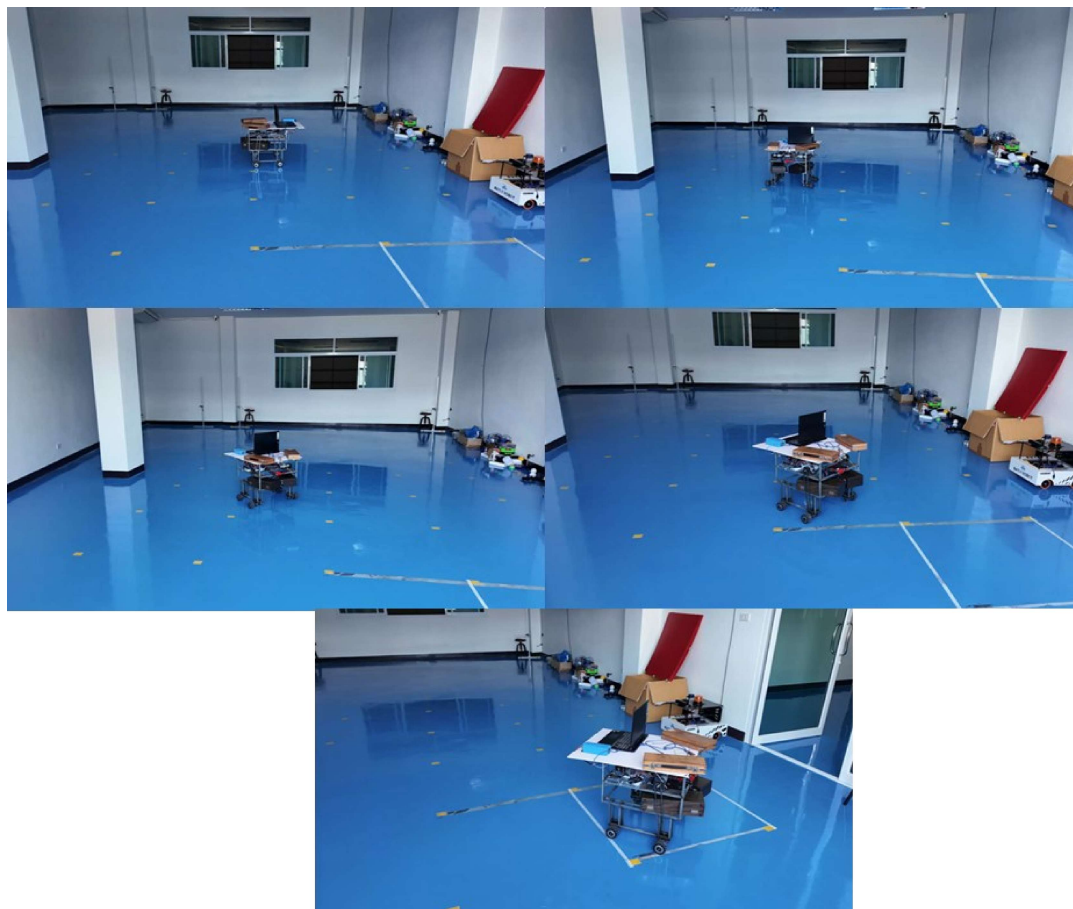
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบเมื่อเจอสิ่งกีดขวาง

4.4.2 ระบบตรวจสอบแบตเตอรี่

เมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะหมดหรืออยู่ในค่าที่กำหนดเราจะให้รถวิ่งไปยังพื้นที่ที่เรา กำหนดให้เตรียมพร้อมสำหรับการชาร์จของรถ ซึ่งจะนำตำแหน่งของรถมาใช้ในการบอกทิศทางที่รถ ควรจะไปยังตำแหน่งที่เรากำหนดไว้โดยเราจะให้รถเดินหน้าไปแล้วหยุดเพื่อเก็บค่าตำแหน่งไว้แล้วก็ ทำการเลี้ยวซ้ายเดินตรงไปเพื่อเก็บค่าตำแหน่งอีกครั้งเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับพื้นที่กำหนดไว้ เพื่อจะให้รถหันรถไปให้ถูกทาง ดังรูปที่ 4.11และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แผนผังระบบตรวจสอบแบตเตอรี่



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบเมื่อแบตเตอรี่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด

4.5 ผลการทดสอบรถพลิกกลับและการควบคุมระยะทางไกล

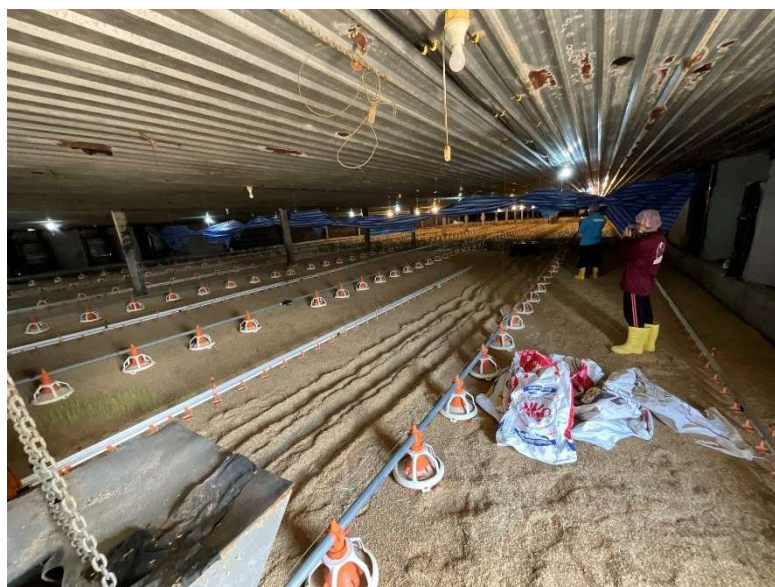
ทำการทดสอบบังคับรถระยะทางไกลโดยได้ทำควบคุมตัวรถในระยะทางต่างๆที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบรีโมทควบคุมรถ

ระยะทาง (เมตร)	จำนวนครั้งที่ควบคุม (ครั้ง)				
	1	2	3	4	5
50	/	/	/	/	/
75	/	/	/	/	/
100	/	/	/	/	/
125	/	/	/	/	/

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบรถพลิกกลับ

เวลา (นาทื)	พื้นที่การทำงาน (ตารางเมตร)	แบตเตอรี่คงเหลือเฉลี่ย (%)
0	0	100
10	110	96
20	220	91
30	330	87
40	440	83
50	550	78



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบรถพลิกกลับนำทางแบบอัตโนมัติ

จากตารางที่ 4.4 พบว่า รถได้ทำการทดสอบทำงานที่ 50 นาที โดยสามารถไถพื้นที่ 550 ตารางเมตร ในช่วงเวลาทำงานแบตเตอรี่จาก 100% ลดลงเหลือ 78% ซึ่งหมายความว่าแบตเตอรี่ถูกใช้ไป 22% จากเวลาที่ทำงาน 50 นาที

4.6 สรุปผล

จากการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากกระบวนการ System Identification โดยการทดลองเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าในช่วง 8 ถึง 22 โวลต์ และค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองในรูปแบบ Transfer Function ผ่าน

โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยเลือกโครงสร้างที่มี 2 โพล และ 1 ซีโร่ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมของระบบได้ใกล้เคียงกับระบบจริงได้ทำการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วย PID Tuner โดยได้ค่าพารามิเตอร์คือ $P = 1.15$ และ $I = 2.55$ และทดสอบใน Simulink พบว่าไม่มี Overshoot และตอบสนองตามความเร็วที่กำหนดอย่างมีเสถียรภาพ ทั้งในช่วงเพิ่มและลดรอบมอเตอร์ จากนั้นได้นำไปทดลองกับระบบจริงซึ่งให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงแบบจำลองอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ ESP32 UWB DW1000 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการวัดระยะในช่วงตั้งแต่ 0.5 เมตรจนถึง 15 เมตร ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 10% ที่ระยะสั้นสุด (0.5 เมตร) และต่ำสุดที่ประมาณ 0.13% ในภาพรวมมีค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.998 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ ส่วนการทดสอบส่วนที่สองใช้เทคนิค Trilateration พบว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอยู่ระหว่าง 0.077 ถึง 0.224 เมตร อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ระบบนำทางอัตโนมัติสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางในระยะ 60 ซม. และหลบหลีกได้อย่างถูกต้อง รวมถึงสามารถนำรถกลับสู่จุดชาร์จเมื่อแบตเตอรี่ต่ำได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ตำแหน่งจากเซนเซอร์ในการกำหนดทิศทาง ส่งผลให้ระบบโดยรวมมีความน่าเชื่อถือและพร้อมสำหรับการใช้งานจริง รถได้ทำการทดสอบทำงานที่ 50 นาที โดยสามารถไถพื้นที่ 550 ตารางเมตร ในช่วงเวลาทำงานแบตเตอรี่จาก 100% ลดลงเหลือ 78%